

**UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**MÓDULO DE COMUNICAÇÃO PARA HABILITAR UM SISTEMA  
AUTOMÁTICO DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS A OPERAR  
EM AMBIENTE DE PRODUÇÃO FÍSICO CIBERNÉTICO**

**IVAN CORRER**

**ORIENTADOR: PROF. DR. ALEXANDRE TADEU SIMON**

PIRACICABA

**2021**

**UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**MÓDULO DE COMUNICAÇÃO PARA HABILITAR UM SISTEMA  
AUTOMÁTICO DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS A OPERAR  
EM AMBIENTE DE PRODUÇÃO FÍSICO CIBERNÉTICO**

**IVAN CORRER**

**ORIENTADOR: PROF. DR. ALEXANDRE TADEU SIMON**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Produção.

PIRACICABA

**2021**

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UNIMEP  
Bibliotecário: Fábio Henrique dos Santos Corrêa – CRB: 8/10150

C824m      Correr, Ivan  
              Módulo de comunicação para habilitar um sistema automático de  
              pré-ajustagem de ferramentas a operar em ambiente de produção  
              físico cibernético / Ivan Correr. – 2021.  
              183 fls.; il.; 30 cm.

              Orientador (a): Prof. Dr. Alexandre Tadeu Simon.  
              Tese (Doutorado) – Universidade Metodista de Piracicaba,  
              Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção,  
              Piracicaba, 2021.

              1. Indústria 4.0. 2. Sistemas físicos cibernéticos. 3. Sistemas de  
              produção físico cibernéticos. 4. Sistemas automáticos de pré-  
              ajustagem de ferramentas. I. Simon, Alexandre Tadeu. II. Título.

CDD – 629.8

**MÓDULO DE COMUNICAÇÃO PARA HABILITAR UM SISTEMA  
AUTOMÁTICO DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS A OPERAR EM  
AMBIENTE DE PRODUÇÃO FÍSICO CIBERNÉTICO.**

**IVAN CORRER**

Tese de Doutorado defendida e aprovada em 30 de setembro de 2021, pela  
Banca examinadora constituída pelos Professores:

Prof. Dr. Alexandre Tadeu Simon – PPGEP/UNIMEP  
Presidente e Orientador

Prof. Dr. Fernando Celso de Campos  
PPGEP/UNIMEP

Prof. Dr. Milton Vieira Junior  
PPGEP/UNIMEP

Prof. Dr. André Luis Helleno  
UP MACKENZIE

Prof. Dr. Raphael Galdino dos Santos  
INSAPER

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, por ter me suportado, dado forças e inspirado ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À Aline, minha amada esposa, que me compreendeu e apoiou neste período de abnegação e dedicação, e aos meus queridos filhos Luca e Matteo. Obrigado por abraçarem meus sonhos.

Aos meus queridos pais José Vilse e Rute, por toda a educação, caráter, amor e ensinamentos de vida e também aos meus irmãos Herton e Anne pelo apoio.

Ao Prof. Dr. Alexandre Tadeu Simon, amigo, conselheiro e orientador, pelas importantíssimas recomendações e colaborações neste trabalho. Obrigado pelo apoio nos momentos mais difíceis e por toda a confiança e dedicação.

Aos Professores Dr. Fernando Celso de Campos, Dr. Milton Vieira Junior, Dr. André Luis Helleno e Dr. Raphael Galdino dos Santos, membros da banca examinadora de qualificação e defesa, pelas contribuições e sugestões.

Aos professores e amigos do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da UNIMEP, que me instruíram, incentivaram e inspiraram ao longo dessa jornada.

À Universidade Metodista de Piracicaba, pela oportunidade oferecida e pela excelente equipe docente.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos.

Aos meus familiares, André, Denise, Gustavo, Letícia, Leonardo, Lionel, Zita, Erick, Adriana, Marta, Sérgio; e amigos, Pedro, Zampar, Rudi, Joice, Tati, Bruna, Evillyn, Prof. Ricardo, Prof. Lucas, Profa. Vanessa, Prof. Marcelo, Prof. Bianco, Prof. Dantas, Prof. Homero pelo companheirismo, incentivo e palavras de apoio.

Obrigado a todos que de alguma forma colaboraram. Sou grato por terem compartilhado seus conhecimentos e pelo tempo que me dedicaram.

*“Não existem planos perfeitos nem viagem perfeita. Mas há um momento em  
que você precisa partir”*

***Amyr Klink***

CORRER, Ivan. **Módulo de comunicação para habilitar um sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas a operar em ambiente de produção físico cibernético**. 2021. 186f. Tese. Doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade Metodista de Piracicaba, Piracicaba, S.P., Brasil.

## RESUMO

A indústria 4.0 caracteriza-se pela busca de benefícios como o aumento da eficiência operacional e redução dos custos de produção a partir da integração e desenvolvimento de um ambiente de manufatura inteligente no qual os Sistemas de Produção Físicos Cibernéticos (*CPPS*) desempenham papel fundamental. Nesse ambiente, a Máquina-Ferramenta 4.0 destaca-se como um dos elos importantes nos *CPPS*, interconectando sistemas e dispositivos físicos ao ambiente cibernético. Um dos dispositivos críticos é o sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno, que possibilita a redução do tempo de *setup* e melhoria da qualidade do processo a partir da medição automática de ferramentas. Apesar dos benefícios propiciados, estes sistemas, ainda não estão habilitados a operar em ambiente de produção físico cibernético, visto que ainda se integram exclusivamente com o CNC da máquina-ferramenta. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um módulo de comunicação para habilitar um sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser a operar no ambiente de produção físico cibernético. A pesquisa apoia-se na identificação dos requisitos dos *CPPS*, funcionalidades dos sistemas de pré-ajustagem existentes no mercado e no desenvolvimento experimental do módulo de comunicação (definição das funcionalidades, projeto e construção do protótipo). A validação da proposta se deu a partir da montagem de um banco de ensaios, implementação da plataforma de computação em nuvem e aplicação da sincronização de eventos (notificações). A aplicação do módulo de comunicação se mostrou adequada uma vez que permitiu a implementação das funcionalidades de diagnóstico remoto, IHM online, serviços online e monitoramento de indicadores produtivos de máquinas-ferramenta CNC. A pesquisa contribui para o avanço da teoria sobre os sistemas de produção físicos cibernéticos e suas implicações práticas se refletem no desenvolvimento tecnológico de sistemas e dispositivos aptos a operarem em ambiente de produção físicos cibernéticos.

**Palavras Chaves:** Indústria 4.0; Sistemas Físicos Cibernéticos; Sistemas de Produção Físico Cibernéticos, Sistemas Automáticos de Pré-ajustagem de Ferramentas

CORRER, Ivan. **Communication module to enable an automatic tool setter system to operate in the Cyber-Physical Production System**. 2021. 186f. Thesis. PhD in Production Engineering from the Methodist University of Piracicaba, Piracicaba, S.P., Brazil.

## **ABSTRACT**

Industry 4.0 stands out for its search for benefits such as increased operational efficiency and reduced production costs from the integration and development of an intelligent manufacturing environment in which Cyber-Physical Production Systems (CPPS) play a fundamental role. In this environment, Machine-Tool 4.0 stands out as one of the important links in CPPS, interconnecting physical systems and devices to the cyber environment. One of the necessary devices is the internal automatic tool setter system, which makes it possible to reduce setup time and improve process quality through automatic tool evaluation. Despite the benefits provided, these systems are not yet able to operate in a physical cybernetic production environment, as it is still exclusively integrated with the CNC machine tool. The objective of this work is to develop a communication module to enable an automatic tool setter system to operate in the cyber-physical production systems. The research is based on the identification of CPPS requirements, functionalities of the tool setter system existing in the market and on the experimental development of the communication module (definition of functionalities, design and construction of the prototype). The proposal was validated by setting up a test bench, implementing the cloud-based platform and applying event synchronization (notifications). The application of the communication module is specified once you want the implementation of remote diagnosis features, online HMI, online services and monitoring of CNC machine tool production indicators. The research contributes to the advancement of theory on cyber-physical production systems and their practical practices are reflected in the technological development of systems and devices capable of operating in cyber-physical production systems.

**Keywords:** Industry 4.0; Cyber-Physical Systems; Cyber-Physical Production Systems, Tool Setter

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	I
LISTA DE QUADROS .....	III
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	IV
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3. OBJETIVO DO TRABALHO.....</b>	<b>4</b>
1.1 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO .....	8
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	8
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>11</b>
2.1 INDÚSTRIA 4.0.....	11
2.1.1 <i>Conceitos e definições</i> .....	13
2.1.2 <i>Integração de sistemas de manufatura</i> .....	15
2.1.3 <i>Fábricas Inteligentes</i> .....	17
2.2 SISTEMAS DE PRODUÇÃO FÍSICOS CIBERNÉTICOS ( <i>CYBER-PHYSICAL PRODUCTION SYSTEMS - CPPS</i> ).....	18
2.2.1 <i>Conceitos e definições sobre Sistemas Físicos Cibernéticos</i> .....	19
2.2.2 <i>Conceitos e definições sobre Sistemas de Produção Físicos Cibernéticos</i> .....	21
2.2.3 <i>Arquiteturas do CPPS</i> .....	23
2.2.4 <i>Requisitos presentes no CPPS</i> .....	30
2.2.5 <i>Aplicação de CPPS em operações e processos de usinagem</i> .....	52
2.3 AMBIENTE DE MANUFATURA 4.0 NOS PROCESSOS DE USINAGEM .....	54
2.3.1 <i>Máquina Ferramenta 4.0 (MF 4.0)</i> .....	56
2.3.2 <i>Internet das Coisas</i> .....	60
2.3.3 <i>Computação em Nuvem</i> .....	62
2.3.4 <i>Comunicação e Protocolos</i> .....	64
2.4 SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS INTERNOS A LASER.....	66
2.4.1 <i>Oportunidades de implementação de funcionalidades aos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos</i> .....	68

<b>3</b>	<b>MÉTODO DE PESQUISA.....</b>	<b>72</b>
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA .....	72
3.2	ABORDAGEM METODOLÓGICA.....	73
3.2.1	<i>Etapa 1.....</i>	<i>74</i>
3.2.2	<i>Etapa 2.....</i>	<i>78</i>
3.2.3	<i>Etapa 3.....</i>	<i>78</i>
<b>4</b>	<b>ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....</b>	<b>82</b>
4.1	DESENVOLVIMENTO ETAPA 1.....	82
4.1.1	<i>RSL sobre a aplicação dos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos ao CPPS da Indústria 4.0 .....</i>	<i>82</i>
4.1.2	<i>RSL sobre os requisitos presentes no CPPS.....</i>	<i>85</i>
4.1.3	<i>Pesquisa documental para identificação das funcionalidades presentes nos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos existentes no mercado.....</i>	<i>91</i>
4.2	DESENVOLVIMENTO ETAPA 2.....	95
4.3	DESENVOLVIMENTO ETAPA 3.....	97
4.3.1	<i>Estágio 1: Definição do modelo.....</i>	<i>98</i>
4.3.2	<i>Estágio 2: Construção do protótipo.....</i>	<i>100</i>
4.3.3	<i>Estágio 3: Aplicação do protótipo .....</i>	<i>111</i>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>123</b>
5.1	RECURSOS INCORPORADOS.....	123
5.2	FUNCIONALIDADES IMPLEMENTADAS.....	124
5.3	REQUISITOS PRESENTES NO AMBIENTE <i>CPPS</i> IMPLEMENTADOS NA PROPOSTA DO SISTEMA .....	127
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>136</b>
6.1	TRABALHOS FUTUROS.....	138
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>139</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESTRUTURA DO TRABALHO .....	10
FIGURA 2 – ESTÁGIOS DA INDUSTRIALIZAÇÃO (ADAPTADO DE KAGERMANN; WAHLSTER; HELD, 2012) .....	12
FIGURA 3 – MODELO DE INTEGRAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 (ADAPTADO DE BAUERNHANSL; HIMPEL; VOGEL-HEUSER, 2014) .....	14
FIGURA 4 – TIPOS DE INTEGRAÇÃO (ADAPTADO DE SIHN, 2016) .....	15
FIGURA 5 - EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS NO AMBIENTE DE MANUFATURA PARA O SURGIMENTO DAS FÁBRICAS INTELIGENTES (ADAPTADO DE SIHN, 2016).....	18
FIGURA 6 – CONFIGURAÇÃO CPS (ADAPTADO DE CARDENAS; AMIN; SASTRY, 2008) .....	20
FIGURA 7 – MIGRAÇÃO DA PIRÂMIDE CLÁSSICA DA AUTOMAÇÃO PARA O CPPS (ADAPTADO DE VDI/VDE, 2013)....	24
FIGURA 8 - RECURSOS BÁSICOS DE UM CPS E A ANALOGIA COM O CPPS. (ADAPTADA DE CARDIN, 2019).....	24
FIGURA 9 – APLICAÇÕES E TÉCNICAS ASSOCIADAS A CADA NÍVEL DA ARQUITETURA 5C NO CPPS (ADAPTADO DE LEE, BAGHERI, KAO, 2015).....	26
FIGURA 10 - INTERAÇÃO ENTRE HUMANOS E MÁQUINAS EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO CIBER-FÍSICOS (ADAPTADO DE BRETTEL ET AL., 2014).....	29
FIGURA 11 – PLACA MANDRIL INTELIGENTE (ADAPTADO DE CYPROS, 2013) .....	52
FIGURA 12 – FERRAMENTA DE USINAGEM INTELIGENTE (ADAPTADO DE BERGER ET AL., 2016) .....	54
FIGURA 13 – OS QUATRO ESTÁGIOS TECNOLÓGICOS DAS MÁQUINAS-FERRAMENTA (ADAPTADO DE LIU; XU, 2017).....	57
FIGURA 14 – MF 4.0 EM AMBIENTE CPPS (ADAPTADO DE XU, 2017).....	59
FIGURA 15 – RELAÇÃO ENTRE CPS E IOT (ADAPTADO DE CAMARINHA-MATOS ET AL., 2013) .....	61
FIGURA 16 - SISTEMA AUTOMÁTICO DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS INTERNO SEM CONTATO A LASER (ADAPTADO DE GEOTECNO, 2020).....	68
FIGURA 17 – CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA .....	72
FIGURA 18 - ABORDAGEM METODOLÓGICA .....	74
FIGURA 19 – ETAPAS DE UMA RSL (ADAPTADO DE LEVY E ELLIS, 2006) .....	76
FIGURA 20 – ESTRUTURA DA PESQUISA DOCUMENTAL (ADAPTADO DE GIL, 2008).....	77
FIGURA 21 - CLASSIFICAÇÃO DE PESQUISA PARA P&D (ADAPTADO DE JUNG; CATEN; RIBEIRO, 2010) .....	79
FIGURA 22 – ESTÁGIOS DO DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL (ADAPTADO DE JUNG, CATEN, RIBEIRO, 2010) .....	80
FIGURA 23 – RSL SOBRE O USO DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS EM AMBIENTE CPPS DA INDÚSTRIA 4.0 .....	84
FIGURA 24 – RSL SOBRE OS REQUISITOS PRESENTES NO CPPS .....	87
FIGURA 25 – REQUISITOS DO CPPS PRESENTES NOS SISTEMAS DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS.....	96
FIGURA 26 – ESTRUTURA DE APLICAÇÃO PROPOSTA (MÓDULO DE COMUNICAÇÃO).....	101

FIGURA 27 – CONJUNTOS ELETRÔNICO DE AQUISIÇÃO E TRANSMISSÃO DE DADOS .....	102
FIGURA 28 – CONJUNTO DE OBTURADORES DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS INTERNO A LASER.....	104
FIGURA 29 – TRANSMISSÃO E COLETA DE DADOS WIRELESS PARA A INTERNET .....	107
FIGURA 30 – CONFIGURAÇÃO DO BANCO DE DADOS .....	108
FIGURA 31 - CONFIGURAÇÃO IHM ONLINE .....	109
FIGURA 32 – CONFIGURAÇÃO DE SINCRONIZAÇÃO DE EVENTOS E EXECUÇÃO DE AÇÕES.....	111
FIGURA 33 – BANCO DE ENSAIOS.....	112
FIGURA 34 – SISTEMA AUTOMÁTICO DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS A LASER - TSG-130 .....	113
FIGURA 35 - IHM ONLINE PARA GESTORES .....	114
FIGURA 36 - IHM ONLINE OPERADORES (AUTOR).....	115
FIGURA 37 - IHM ONLINE FABRICANTE .....	116
FIGURA 38 – NOTIFICAÇÕES RECEBIDAS PELO OPERADOR: A) SMS E B) E-MAIL .....	117
FIGURA 39 – FLUXO DE INFORMAÇÕES ENTRE OS ENVOLVIDOS NO PROCESSO .....	118
FIGURA 40 – REQUISITOS PRESENTE NO AMBIENTE CPPS IMPLEMENTADOS NA PROPOSTA .....	128

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – SÍNTESE DOS CONCEITOS E DEFINIÇÕES SOBRE O CPS.....	21
QUADRO 2 – REQUISITOS PRESENTES NO CPPS .....	31
QUADRO 3 – REQUISITOS PRESENTES NO CPPS APRESENTADOS PELOS AUTORES .....	88
QUADRO 4 – SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS INTERNOS EXISTENTES NO MERCADO.....	93
QUADRO 5 – FUNCIONALIDADES PRESENTES NOS SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS INTERNOS EXISTENTES NO MERCADO .....	94
QUADRO 6 – RECURSOS A SEREM INCORPORADOS AO MÓDULO DE COMUNICAÇÃO PARA O SISTEMA AUTOMÁTICO DE PRÉ- AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS INTERNO A LASER.....	98
QUADRO 7 – FUNCIONALIDADES A SEREM IMPLEMENTADAS AO SISTEMA AUTOMÁTICO DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS INTERNO.....	99
QUADRO 8 – LISTA DE NOTIFICAÇÕES CONFIGURADAS PARA O OPERADOR.....	119
QUADRO 9 - LISTA DE NOTIFICAÇÕES CONFIGURADAS PARA O GESTOR.....	120
QUADRO 10 - LISTA DE NOTIFICAÇÕES CONFIGURADAS PARA DEPARTAMENTO TÉCNICO DA EMPRESA FABRICANTE .....	121
QUADRO 11 – DESCRIÇÃO DOS REQUISITOS TECNOLÓGICOS PRESENTES NO CPPS IMPLEMENTADOS NA PROPOSTA .....	129
QUADRO 12 - DESCRIÇÃO DOS REQUISITOS DE GERENCIAMENTO DE OPERAÇÕES PRESENTES NO CPPS IMPLEMENTADOS NA PROPOSTA.....	134

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

*CLP – Programmable Logic Controller*

*CNC – Computer Numeric Control*

*CPMT – Cyber-Physical Machine Tools*

*CPPS – Cyber-Physical Production System*

*CPS – Cyber-Physical System*

*DNC – Direct Numerical Control*

*ERP – Enterprise Resource Planning*

*GPRS - General Packet Radio Services*

*HMI – Human Machine Interface*

*HTTP – Hyper Text Transfer Protocol*

*I 4.0 – Industry 4.0*

*IoT – Internet of Things*

*M2M – Machine to Machine*

*MES – Manufacturing Execution Systems*

*MF – Máquina-Ferramenta*

*MT 4.0 – Machine Tools 4.0*

*OCDE - Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico*

*OPC UA - Open Platform Communications Unified Architecture*

*pH - Potencial Hidrogeniônico*

*RFID – Radio Frequency Identification*

*RSL – Revisão Sistemática da Literatura*

*SMS - Short Message Service*

*TDI - Tool Data Information*

*USB - Universal Serial Bus*

*VCC – Tensão em corrente contínua*

*Wi-Fi - Wireless Fidelity*

*XML - Extensible Markup Language*

## 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo inicial contextualiza a importância do desenvolvimento dos Sistemas de Produção Físicos Cibernéticos da Indústria 4.0 e os benefícios esperados diante de habilitar um sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser a operar nesse ambiente. Apresenta ainda, a lacuna da literatura, justificativa deste trabalho, seu objetivo, as delimitações e sua estrutura.

### 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A Indústria 4.0 se caracteriza pela forte customização dos produtos sob condições de produção altamente flexível, pela ampla interação de clientes e parceiros comerciais na cadeia valor, e o vínculo de produção e serviços de alta qualidade (WOLFGANG, 2012; KAGERMANN *et al.*, 2013; BOCHMANN *et al.*, 2015).

No ambiente fabril, a Indústria 4.0 tem como finalidade gerar a customização em massa de produtos manufaturados, realizar a adaptação automática e flexível da cadeia produtiva, rastrear peças e produtos, facilitar a comunicação entre peças, produtos e máquinas, gerar a Interação Homem-Máquina (IHM), alcançar a otimização da produção em fábricas inteligentes, e, fornecer novos serviços e modelos de negócios de interação na cadeia de valor (SCHLICK, 2014; SHAFIQ *et al.*, 2016).

Uma etapa fundamental para a integração do ambiente de manufatura na Indústria 4.0 é o desenvolvimento de um ambiente de manufatura inteligente, possibilitado pela aplicação dos Sistemas de Produção Físicos Cibernéticos (XU, 2017; LU; XU, 2019).

Os Sistemas de Produção Físicos Cibernéticos (*Cyber-Physical Production Systems – CPPS*) consistem de elementos e subsistemas autônomos e

cooperativos que são conectados em todos os níveis de produção, desde os processos, passando pelas máquinas, até as redes de produção e logística (MONOSTORI, 2014; ACATECH, 2015; MONOSTORI *et al.*, 2016).

A implementação do *CPPS* está gerando mudanças significativas nos processos de fabricação e sistemas de controle de produção, levando ao conceito de manufatura inteligente (GRÄBLER; PÖHLER, 2017; KOENIG, 2017a; WU; GOEPP; SIADAT, 2019).

Um dos principais requisitos do *CPPS* é atuar na interconectividade entre os sistemas, dispositivos, equipamentos, máquinas e componentes, de modo que todos os níveis de produção possam se comunicar (WANG; TORNGREN; ONORI, 2015; MEISSENER; HERMANN; AURICH, 2019; LINS *et al.*, 2020).

Em um ambiente tão amplo, a conectividade entre sistemas e equipamentos é obrigatória. No entanto, essa não é uma tarefa simples, pois modelos, sistemas e conceitos heterogêneos de uma gama extremamente ampla de fabricantes precisam ser integrados. A interoperabilidade de dispositivos, equipamentos e sistemas exige uma arquitetura de integração que possibilite a troca de informações (SCHLECHTENDAHL *et al.*, 2015).

Nesse conceito de interconectividade nos ambientes de manufatura, a Máquina-Ferramenta 4.0 (*MF 4.0*) destaca-se como um dos elos importantes dos *CPPS* (GALAMBOS *et al.*, 2015; LIU; LI, 2019; LIU *et al.*, 2020).

A *MF 4.0* define uma geração de máquinas com um novo nível de integração, caracterizada pela integração vertical e horizontal, sendo assim, mais inteligentes, bem conectadas, amplamente acessíveis, mais adaptáveis e mais autônomas (XU, 2017). Esta geração de máquinas apresenta uma extensa implementação de tecnologias de sistemas físicos cibernéticos, internet das coisas e computação em nuvem (LIU *et al.*, 2020).

São três os níveis que compõe uma *MF 4.0* em um ambiente *CPPS*: *i*) o nível físico, no qual encontra-se a máquina-ferramenta com todos sensores e

dispositivos de aquisição de dados internos, bem como dispositivos externos com comunicação via rede física ou internet (MOURTZIS, 2020); *ii*) o nível cibernético, que funciona como o cérebro da máquina-ferramenta, que se utiliza de dados coletados, e promove funcionalidades inteligentes e autônomas (AL-MAEENI *et al.*, 2020); *iii*) o nível da computação em nuvem, que possibilita uma Interface Homem–Máquina Inteligente, visto que, com extensos dados coletados em tempo real e cálculos profundamente integrados aos processos de usinagem, este nível permite aos usuários interagir intuitivamente com o sistema e tomar decisões eficientes (JEON *et al.*, 2020).

No que diz respeito ao nível físico, um dos dispositivos integrados à máquina-ferramenta é o **sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno**. Este sistema possui recursos que, durante o processo de usinagem, possibilita: a pré-ajustagem das ferramentas de corte; a detecção de avarias e quebra das ferramentas; e a compensação do desgaste das ferramentas (SORTINO; BELFIO; MOTYL, 2014; KOENIG, 2017b). Estes recursos, promovem a redução do tempo de preparação da máquina (*setup*), aumento do tempo de disponibilidade da máquina-ferramenta CNC, e aumento da qualidade do processo de usinagem (SIMON, 2002; VIEIRA JUNIOR *et al.*, 2016; EVANGELISTA *et al.*, 2019; CHENG *et al.*, 2019).

Entretanto, apesar dos benefícios apresentados anteriormente, **os sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos, ainda não estão habilitados a operarem em ambiente de produção físico cibernético da Indústria 4.0**.

Diferentemente de outros dispositivos e sensores recém-desenvolvidos e utilizados na manufatura, na qual estão cada vez mais integrados e conectados pela tecnologia sem fio e com uso de computação em nuvem, e assim habilitados ao ambiente *CPPS* (LIU *et al.*, 2020; LINS *et al.*, 2020), os sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas interno ainda estão apenas integrados, fisicamente e exclusivamente, com o CNC da máquina-ferramenta (YU, 2019).

Segundo Chen *et al.* (2017) um sistema automático de pré-ajustagem de ferramenta habilitado a operar em ambiente *CPPS* desempenhará um importante papel na manufatura inteligente.

## 1.2. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Com o crescimento da manufatura inteligente, novos modelos de interface de comunicação homem-máquina estão surgindo para o estabelecimento do ambiente *CPPS* (MONOSTORI, 2014; RIBEIRO, 2017). O objetivo do ambiente *CPPS* não é remover humanos, mas envolvê-los completamente usando sua inteligência (WU; GOEPP; SIADAT, 2019). Nesse novo campo de interação, os trabalhadores deparam-se com interfaces computadorizadas abundantes, tomada de decisões mais complexas e um ambiente de produção autônomo (LIU *et al.*, 2017a).

Na manufatura inteligente, o diagnóstico remoto, a previsão de falhas e o reparo autônomo já são uma realidade em muitos dispositivos, sistemas e máquinas (HWANG, 2016; KUSIAK, 2017; PANETTO *et al.*, 2019). Máquinas e dispositivos inteligentes acionam processos de manutenção automaticamente antes da ocorrência da falha, minimizando o tempo de inatividade do processo de fabricação (GORECKY; LOSKYLL, 2014; KOENIG, 2017b; TRAN *et al.*, 2019).

Com a expansão do ambiente *CPPS* da Indústria 4.0, surgem novas oportunidades para que empresas desenvolvam e ofereçam serviços para a cadeia produtiva a partir de novos modelos de negócios (SCHLICK, 2014; SHAFIQ *et al.*, 2016). Nesse cenário, muitas empresas já oferecem serviços com valor agregado aos seus usuários (LIU; XU, 2017; SHAO, 2021), mas ainda existe um vasto campo a ser explorado pelas empresas, como no caso de fabricantes de máquinas-ferramenta para usinagem que podem fornecer serviços de otimização de usinagem e diagnósticos de consumo de ferramental a seus usuários, respectivamente (OOI *et al.*, 2017).

No nível da máquina-ferramenta de usinagem encontram-se inúmeros dispositivos periféricos integrados, utilizados para enviar e/ou receber informações. Estes dispositivos são sensores (dinamômetros, acelerômetros, emissão acústica, potência, efeito *hall*, temperatura, entre outros), câmeras, etiquetas e leitores *RFID*, comandos por voz, **sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos**, dispositivos de processamento de sinais, entre outros. Estes dispositivos de aquisição de dados são responsáveis por coletar dados de fabricação em campo, em tempo real, dos componentes críticos e processos de usinagem, de modo que os dados importantes gerados durante os processos possam ser registrados e analisados (TETI; JEMIELNIAK; O`DONNELL, 2010; AL-MAEENI *et al.*, 2020; JEON *et al.*, 2020).

No que diz respeito aos **sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos**, também conhecidos por *toolsetter*, estes possuem recursos que possibilitam, durante o processo de usinagem, identificação da ferramenta; detecção de quebra da ferramenta; pré-ajustagem das ferramentas; redução de erros no *setup* relacionados ao posicionamento da ferramenta e/ou peça; medição dinâmica da ferramenta; compensação do desgaste da ferramenta; e compensação da dilatação térmica da máquina e da ferramenta (SORTINO; BELFIO; MOTYL, 2014; KOENIG, 2017b). Estes recursos, propiciam aumento na precisão da medição das ferramentas utilizadas no processo, redução do tempo de preparação da máquina, melhora a eficiência na usinagem e aumentam o tempo de disponibilidade da máquina-ferramenta CNC (VIEIRA JUNIOR *et al.*, 2016; EVANGELISTA *et al.*, 2019; CHENG *et al.*, 2019).

No entanto, os sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos existentes não estão habilitados a operar em ambiente CPPS, pois não interagem com outros sistemas, comunicando-se apenas com o CNC da máquina-ferramenta (YU *et al.*, 2017). Isso significa que eles ainda não oferecem uma interface de comunicação homem-máquina inteligente, na qual, dados, informações e diagnósticos do sistema automático de pré-ajustagem e do

processo produtivo, sejam compartilhados entre operadores, gestores e fabricantes desses sistemas, para tomada de decisão mais rápida e assertiva.

A integração dessa interface, além de habilitar os sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos a operar em ambiente CPPS e apoiar a maior interação da máquina-ferramenta no mesmo ambiente, permitirá o melhor aproveitamento do dispositivo e oferecerá recursos adicionais como, por exemplo, serviços de monitoramento e diagnóstico *online* sobre a condição operacional do sistema de pré-ajustagem e sua manutenção, indicadores de eficiência para a máquina-ferramenta, monitoramento do consumo e do estado da ferramenta de corte, controle do estoque de ferramentas de corte , e contratação de serviço por meio de comodato de equipamentos aos usuários (cobrança deste serviço a partir das funcionalidades contratadas).

A partir dessas considerações estabelece-se a seguinte questão de pesquisa desta tese: ***Como habilitar um sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser a operar em ambiente de produção físico cibernético da Indústria 4.0?***

### **1.3. OBJETIVO DO TRABALHO**

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um módulo de comunicação para habilitar um sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser a operar em ambiente de produção físico cibernético da Indústria 4.0.

Esta pesquisa tem ainda como objetivos específicos:

- Identificar as funcionalidades presentes nos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos dos fabricantes destes sistemas, e identificar funcionalidades para um sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser a operar em ambiente *CPPS* da Indústria 4.0;

- Identificar quais os requisitos necessários para habilitar um sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser a operar em ambiente *CPPS* da Indústria 4.0.
- Projetar e construir um módulo de comunicação para habilitar o sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser a operar em ambiente *CPPS* da Indústria 4.0.

Nas empresas de manufatura, ainda existe um grande número de máquinas-ferramenta CNC que não estão habilitadas a operarem em ambiente *CPPS* da Indústria 4.0. Entretanto, as funcionalidades dos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos, apresentadas anteriormente, também podem ser implementadas nestas máquinas e contribuir para o avanço destas empresas rumo a Indústria 4.0.

Assim sendo, para um sistema automático de pré-ajustagem interno operar em ambiente de produção físico cibernético no contexto da Indústria 4.0 é necessário que este sistema ofereça funcionalidades como diagnóstico remoto, interação homem-máquina inteligente, comunicar com outros dispositivos e fornecer novos serviços com geração de valor para a cadeia produtiva.

Espera-se que a resposta da questão de pesquisa do presente trabalho gere contribuições significativas para os sistemas de manufatura dentro da perspectiva de planejamento, controle e diagnósticos de processos muito mais flexíveis e adaptáveis.

Para se alcançar o primeiro objetivo específico, será realizada uma Revisão Sistemática da Literatura para identificar a inserção de sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas interno ao ambiente *CPPS*, e também será realizada uma Pesquisa Documental para identificar as funcionalidades presentes nos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos disponíveis no mercado.

Para a obtenção do segundo objetivo específico, será realizada uma Revisão Sistemática da Literatura para identificar os requisitos presentes no ambiente *CPPS*.

E por fim, para cumprir o terceiro objetivo específico, será realizada o Desenvolvimento Experimental de um módulo de comunicação para um sistema automáticos de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser. A partir disso, o trabalho será complementado por meio da realização de testes com a finalidade de demonstrar a aplicabilidade da proposta apresentada.

### **1.1 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO**

O escopo desta tese é delimitado em habilitar novos recursos e funcionalidades em um sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser, por meio do projeto e construção de um módulo de comunicação, e que possibilite operar em ambiente *CPPS* da Indústria 4.0.

### **1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho está estruturado em 6 capítulos, apresentados na Figura 1, incluindo este capítulo introdutório, que contextualiza a importância e justificativa da pesquisa, destaca o objetivo geral e delimita o estudo.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão narrativa sobre a Indústria 4.0, sistemas de produção físicos cibernéticos, ambiente de manufatura 4.0 nos processos de usinagem e sistemas automáticos e pré-ajustagem de ferramentas internos. Neste capítulo, será apresentado ainda os resultados de uma Revisão Sistemática da Literatura e Pesquisa Documental sobre sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos para demonstrar a lacuna na literatura que fundamenta este trabalho. Também será apresentado os resultados de uma Revisão Sistemática da Literatura sobre os requisitos presentes nos *CPPS* para

auxiliar na etapa do planejamento do desenvolvimento experimental da presente pesquisa.

O Capítulo 3 retrata o método de pesquisa e sua abordagem metodológica descrevendo os procedimentos empregados: Revisão Sistemática da Literatura, Pesquisa Documental e Desenvolvimento Experimental.

O Capítulo 4 evidencia as etapas do desenvolvimento da pesquisa e apresenta a lacuna encontrada, a partir das revisões sistemáticas da literatura e da pesquisa documental, da inserção de funcionalidade dos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos a operar em ambiente *CPPS*. Neste capítulo, será apresentado ainda o desenvolvimento experimental a partir dos estágios de definição de modelo, construção do protótipo e aplicabilidade da proposta apresentada.

O Capítulo 5 demonstra a discussão dos resultados obtidos a partir dos recursos incorporados; funcionalidades implementadas; e os requisitos dos *CPPS* inseridos nesta proposta.

O Capítulo 6 apresenta as principais conclusões do trabalho e sugestões para pesquisas futuras.

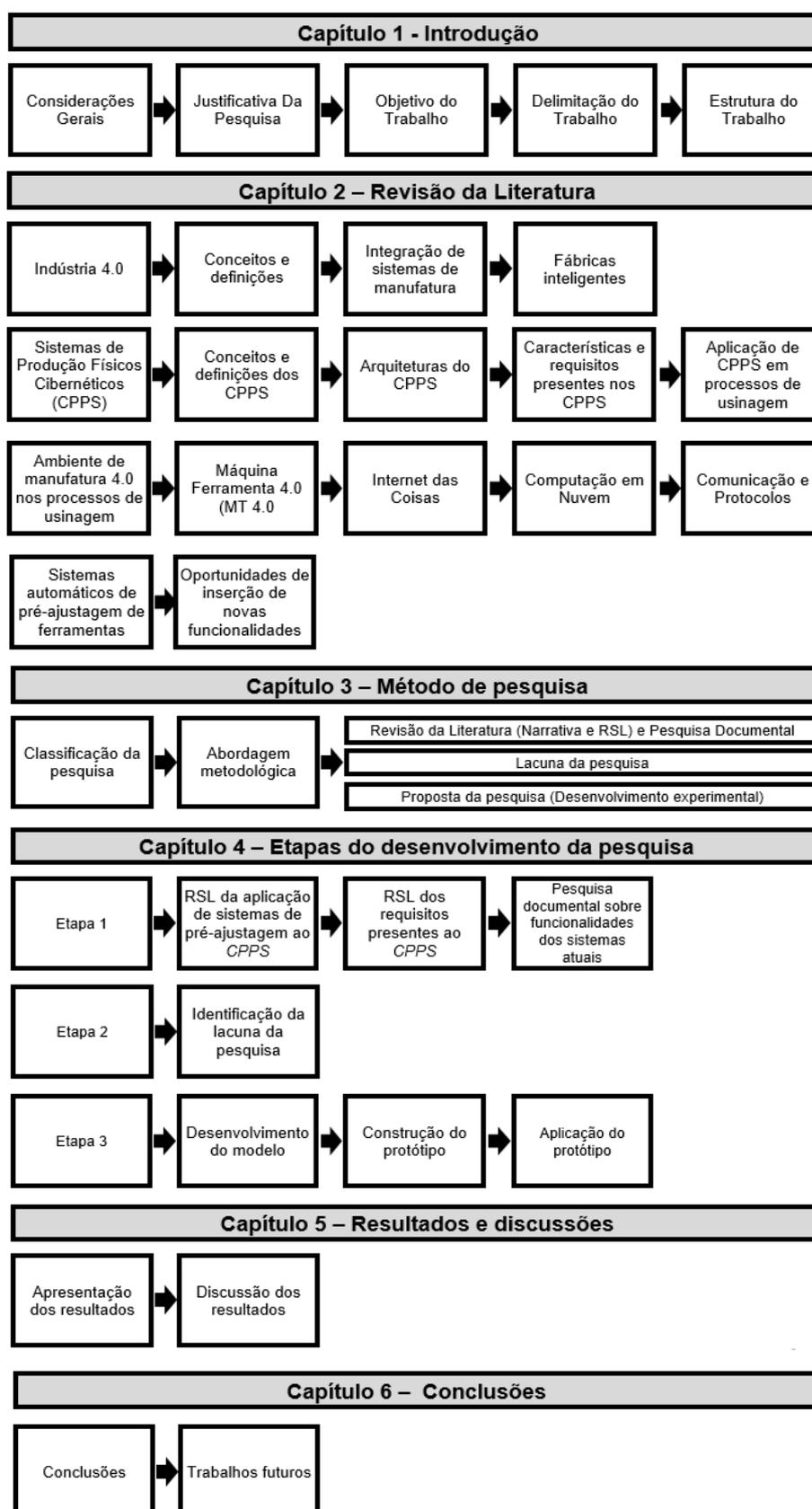


FIGURA 1 – ESTRUTURA DO TRABALHO

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta a revisão da literatura com as definições, conceitos, tecnologias e aplicação da Indústria 4.0, dos Sistemas de Produção Físicos Cibernéticos, dos ambientes de manufatura 4.0 nos processos de usinagem, e dos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas.

Inicialmente, é apresentado o conceito da Indústria 4.0, seguido da apresentação dos conceitos e requisitos dos *CPPS*. Adicionalmente, é apresentado sobre os ambientes de manufatura 4.0 nos processos de usinagem e por fim sobre os sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas e sua importância nas operações em máquinas-ferramenta CNC e na produtividade do processo.

A revisão da literatura sobre *CPPS* e sistemas de pré-ajustagem de ferramentas foi estruturada a partir da revisão sistemática da literatura e pesquisa documental, verificando assim, a lacuna da literatura sobre a aplicação de sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas ao *CPPS* da Indústria 4.0.

### 2.1 INDÚSTRIA 4.0

O termo Indústria 4.0 foi introduzido pela primeira vez em 2011, durante a Feira de Hannover, como “*Industry 4.0*” por um grupo de representantes de diferentes áreas (como Negócios, Política e Academia) conforme uma iniciativa estratégica alemã para assumir um papel pioneiro nas empresas do setor de manufatura (XU; XU; LI, 2018). Em abril de 2013, foi definido o “grupo de trabalho da Indústria 4.0” e se apresentou a primeira proposta de aplicação (KAGERMANN *et al.*, 2013).

A noção de Indústria 4.0, ou quarta revolução industrial, baseia-se nos quatro estágios de industrialização apresentados na Figura 2. A primeira revolução industrial começou com a introdução da energia hídrica e energia a vapor no final do século XVIII, que foi seguida pela segunda revolução industrial, por meados

da virada do século XX com a introdução de técnicas de produção em massa movida a eletricidade e a extensa departamentalização do trabalho. A terceira revolução industrial, também chamada de "revolução digital", começou no início dos anos 70 e baseou-se na aplicação de sistemas eletrônicos e tecnologia da informação para melhorar a automação e inteligência na fabricação de equipamentos e processos (KAGERMANN; LUKAS; WAHLSTER, 2011; KAGERMANN; WAHLSTER; HELD, 2012; XU, 2017; XU; XU; LI, 2018).



FIGURA 2 – ESTÁGIOS DA INDUSTRIALIZAÇÃO (ADAPTADO DE KAGERMANN; WAHLSTER; HELD, 2012)

Inicialmente, o grupo formado pelo governo alemão para o desenvolvimento da Indústria 4.0 baseou-se no pressuposto de que a produção industrial no futuro seria caracterizada pela forte customização dos produtos sob condições de produção altamente flexível (WOLFGANG, 2012; BOCHMANN *et al.*, 2015), pela ampla integração de clientes e parceiros de negócios em negócios de valor, processos adicionais e a vinculação de produção e serviços de alta qualidade que levam aos chamados produtos híbridos (KAGERMANN; LUKAS; WAHLSTER, 2011; KAGERMANN *et al.*, 2013). Essa abordagem, apresentada

pelo governo alemão, visou fortalecer o poder competitivo de sua Indústria perante a todos os outros países (THOBEN; WIESNER; WUEST, 2017).

Outros países também desenvolveram programas relacionados ao contexto da Indústria 4.0, mas identificam estes programas por meio de outras nomenclaturas como: *Liderança em Inovação* ou *Made in China 2025* (China), *Advanced Manufacturing Program* (EUA), *4IR* (Reino Unido), *Iniciativa da Cadeia de Valor Industrial* (Japão) (OZTEMEL; GURSEV, 2018).

### **2.1.1 CONCEITOS E DEFINIÇÕES**

Para Klocke *et al.* (2011) a Indústria 4.0 compreende uma mudança de paradigma da fabricação automatizada para um conceito de fabricação inteligente. Os mundos físico e virtual crescem juntos e objetos, incluindo máquinas, são equipados com sensores e atuadores.

Anderl (2014) apresenta que a Indústria 4.0 é uma abordagem estratégica para integrar sistemas avançados de controle com tecnologia de internet, permitindo a comunicação entre pessoas, produtos e sistemas complexos.

Lasi *et al.* (2014) retratam que a Indústria 4.0 fornece uma nova visão para os sistemas de fabricação. Essa visão, definitivamente, produz um ambiente de fabricação composto por produto, inteligência, comunicação e rede.

Bauernhansl, Himpel e Vogek-Heuser (2014) esclarecem que a Indústria 4.0 representa uma nova maneira de organização e controle de sistemas completos de agregação de valor (Figura 3). O objetivo principal é satisfazer as necessidades individuais dos clientes, a um custo compatível com o custo da produção em massa. Por isso, afeta todas as áreas, desde a gestão de pedidos, passando por pesquisa e desenvolvimento, fabricação, entrega ao uso e até a reciclagem de bens produzidos. Portanto, todos os recursos envolvidos, como trabalhadores, produtos, recursos e sistemas, devem estar integrados como instâncias inteligentes, auto-organizadas, intercorporativas, em tempo real e autonomamente otimizadas.



*FIGURA 3 – MODELO DE INTEGRAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 (ADAPTADO DE BAUERNHANSL; HIMPEL; VOGEK-HEUSER, 2014)*

Thames e Schaefer (2016) apresentam que o objetivo da Indústria 4.0 é atingir um nível mais alto de operação e eficiência e produtividade, além de um nível mais alto de automação nas empresas.

Para Shafiq *et al.* (2016) a Indústria 4.0 facilita a interconexão e a informatização na Indústria tradicional. Os objetivos da Indústria 4.0 visam fornecer a customização em massa de produtos manufaturados ativados por TI; fazer adaptação automática e flexível da cadeia produtiva; rastrear peças e produtos; facilitar a comunicação entre peças, produtos e máquinas; aplicar paradigmas de interação homem-máquina (IHM); alcançar otimização da produção habilitada para a internet das coisas (*Internet of Things - IoT*) em fábricas inteligentes; e fornecer novos tipos de serviços e modelos de negócios de interação na cadeia de valor.

Lu (2017) define a Indústria 4.0 como um processo de fabricação integrado, adaptado, otimizado, orientado a serviços, interoperável, correlacionado a alta tecnologia.

Thoben, Wiesner e Wuest (2017) salientam que a Indústria 4.0 baseia-se na introdução da Internet das coisas e da internet de serviços (*Internet of Services – IoS*) nas empresas de manufatura, levando a sistemas de produção integrados.

### 2.1.2 INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE MANUFATURA

Kagermann, Wahlster e Helbig (2013) e Shafiq *et al.* (2015) apresentam que a Indústria 4.0 enfatiza a extensão dos sistemas de manufatura tradicionais para a integração total de sistemas físicos, incorporados a Tecnologia da Informação (TI). Destacam-se três tipos de integração: *i*) integração horizontal através de redes de valor, *ii*) integração digital de ponta a ponta da engenharia em toda a cadeia de valor e *iii*) integração vertical e sistemas de manufatura em rede (Figura 4).

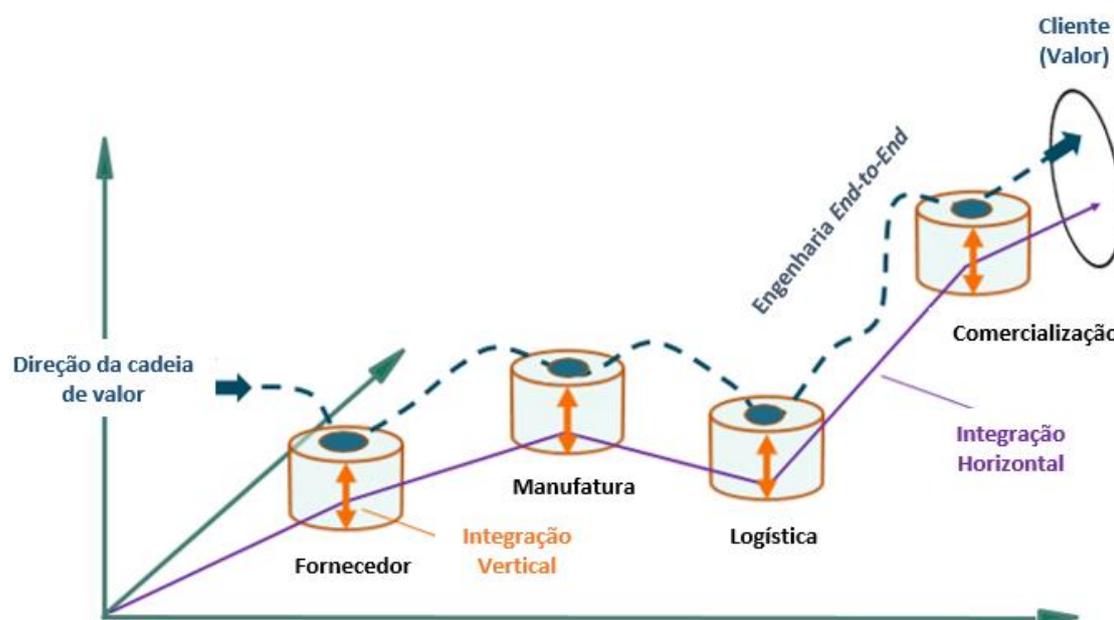


FIGURA 4 – TIPOS DE INTEGRAÇÃO (ADAPTADO DE SIHN, 2016)

Em relação aos tipos de integração, GTAI (2014), Shafiq *et al.* (2015), Qin, Liu e Grosvenor (2016), Stock e Selinger (2016), Liao *et al.* (2017) e Kusiak (2017) definem como:

- **Integração horizontal:** integração dos vários sistemas de TI usados nos diferentes estágios dos processos de manufatura e planejamento de negócios de uma empresa e entre várias empresas diferentes (redes de valor);
- **Integração Vertical:** integração dos vários sistemas de TI nos diferentes níveis hierárquicos (por exemplo, nível do atuador e sensor, nível de fabricação e execução, nível de gerenciamento da produção e níveis de planejamento corporativo), conectando processos de negócios a processos técnicos; e
- **Integração digital de ponta a ponta:** integração em todo o processo de engenharia, para que o mundo digital e o mundo real sejam integrados em toda a cadeia de valor de um produto e em diferentes empresas, além de incorporar os requisitos do cliente.

Espera-se que a Indústria 4.0 atinja as três principais integrações, conforme descrito acima, além de integração de hardware, integração de software e integração de dados e informações. Para isso, necessita-se garantir a integração eficiente de dados em tempo real nos processos de produção da Indústria 4.0 (QIN; LIU; GROSVENOR, 2016; LIAO *et al.*, 2017; KUSIAK, 2017).

Para Oztemel e Gursev (2018) o ambiente da Indústria 4.0 necessita de parâmetros de conectividade e colaboração. É importante receber *feedback* dos usuários finais e fornecer valor agregado instantâneo a todas as partes interessadas, não apenas aos fornecedores. Os sistemas de rede devem ser inteligentes para possibilitar a personalização.

A principal abordagem da Indústria 4.0, segundo Anderl (2014) é equipar produtos e sistemas de produção com sistemas como base para sensores inteligentes e atuadores inteligentes para permitir a comunicação e o controle inteligente da operação, levando ao contexto de Fábricas Inteligentes.

### 2.1.3 FÁBRICAS INTELIGENTES

O objetivo da Indústria 4.0 é o surgimento de fábricas inteligentes caracterizadas pelas redes inteligente, mobilidade, flexibilidade, integração de clientes e modelos de negócios inovadores (WOLFGANG, 2012; STOCK; SELINGER, 2016).

Kagermann, Wahlster e Held (2012) apresentam as que fabricas inteligentes estabelecem redes globais que incorporam máquinas, sistemas de armazenamento e instalações de produção na forma de sistemas de produção físico cibernéticos.

Para Roblek, Mesko e Krapez (2016), a Indústria 4.0 torna as fábricas mais inteligentes, flexíveis e dinâmicas, equipando a manufatura com sensores, atuadores e sistemas autônomos. Além disso, o processo de fabricação tem a capacidade de cumprir padrões e requisitos mais complexos e qualificados dos produtos, conforme o esperado.

Com a disponibilidade de todas as informações relevantes em tempo real, caracterizada pela Indústria 4.0, permitirá que os sistemas de manufatura atendam aos requisitos do cliente sem desperdício, devido à reconfiguração das linhas de montagem ou dos tempos de configuração por meio de processos dinâmicos de negócios e engenharia (THOBEN; WIESNER; WUEST, 2017).

Schlick (2014) e Bauer *et al.* (2014) apresentam que a Indústria 4.0 visa tornar possível a preparação e análise dos dados das máquinas em tempo real; isso permite processos mais rápidos, flexíveis e eficientes para produzir produtos de maior qualidade.

A Figura 5 apresenta a evolução dos sistemas no ambiente de manufatura para o surgimento das Fábricas Inteligentes.

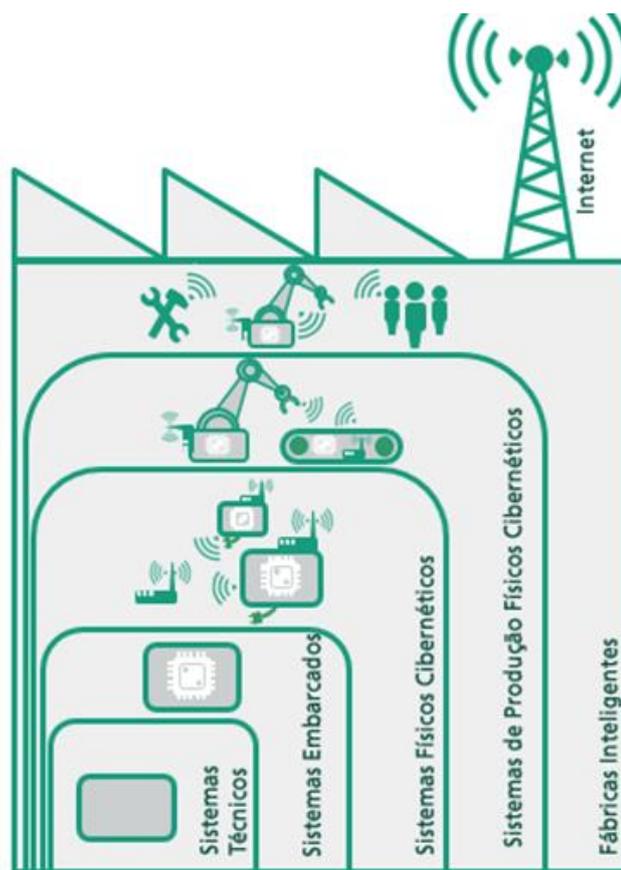


FIGURA 5 - EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS NO AMBIENTE DE MANUFATURA PARA O SURGIMENTO DAS FÁBRICAS INTELIGENTES (ADAPTADO DE SIHN, 2016).

Como pode ser observado na Figura 5, a Fábrica Inteligente é fruto da evolução de sistemas que parte de sistemas técnicos, passa por sistemas embarcados, sistemas físicos cibernéticos e, por fim chega aos sistemas de produção físicos cibernéticos. Nesse sentido Lee, Bagheri e Kao (2015), Monostori *et al.* (2016) e Ribeiro (2017) apresentam que o *CPPS* é visto como o pilar da Fábrica Inteligente.

## 2.2 SISTEMAS DE PRODUÇÃO FÍSICOS CIBERNÉTICOS

Neste subcapítulo será apresentada a contextualização histórica do *CPPS*, baseado inicialmente na definição genérica do Sistemas Físicos Cibernéticos (*Cyber-Physical Systems – CPS*), e posteriormente na contextualização desses sistemas aplicados nos ambientes de manufatura na forma de *CPPS*.

De ordem cronológica, em 2006 nos Estados Unidos foi apresentado o termo *CPS*, com o entendimento da necessidade da interação entre mundo físico e computadorizado, influenciada pelo controle, comunicação e computação (LEE, 2008). Já a definição do termo *CPPS* ocorreu em 2014, e apresenta que o *CPPS* consiste de elementos e subsistemas autônomos e cooperativos que são conectados com base no contexto dentro e em todos os níveis de produção, desde os processos, passando pelas máquinas, até as redes de produção e logística (MONOSTORI, 2014).

Segundo Wu, Goepp e Siadat (2019), como o *CPPS* é um termo relativamente novo, não há definição padrão e acordada. Muitos pesquisadores, como Rudtsch *et al.* (2014), Perez *et al.* (2015), Thiede, Juraschek e Herrmann (2016), Nayak *et al.* (2016), Napoleone, Macchi e Pozzetti (2020) apresentam o conceito de *CPPS* como a aplicação do *CPS* no campo de manufatura e produção.

Portanto, para o presente trabalho serão apresentadas inicialmente a contextualização universal do *CPS*, e posteriormente, as definições, conceitos e aplicações nos ambientes de produção e de manufatura, por meio do *CPPS*.

### **2.2.1 CONCEITOS E DEFINIÇÕES SOBRE SISTEMAS FÍSICOS CIBERNÉTICOS**

O *CPS* abrange conhecimentos e princípios de disciplinas computacionais e de engenharia, redes, controles, softwares, interação humana, teoria de aprendizagem, tais como elétrica, mecânica, química, biológicas ciências físicas, engenharia e informação (ACATECH, 2011).

O *CPS* é considerado também uma das tecnologias que integra os mundos virtual e físico, fazendo desaparecer as fronteiras entre esses dois mundos (BETTENHAUSEN; KOWALESKI, 2013; VARGHESE; TANDUR, 2014; SALDIVAR *et al.*, 2015; DE SIVA; DE SILVA, 2016; KIM, 2017; OZTEMEL; GURSEV, 2018).

A primeira definição para esse termo foi disseminada em 2008 apresentando que o *CPS* é baseado em interações físicas e de computação interligados a redes de

comunicação, que realizam o monitoramento, atuação e controle dos processos físicos (LEE, 2008; LEE, 2010; WAN *et al.*, 2010; GUNES *et al.*, 2015).

Para Cardenas, Amin e Sastry (2008) o *CPS* integra recursos de computação e comunicação com monitoramento e controle dos elementos no mundo físico. Esses sistemas geralmente são compostos por um conjunto de agentes em rede, incluindo: sensores, atuadores, unidades de processamento de controle e dispositivos de comunicação, conforme apresentado na Figura 6.

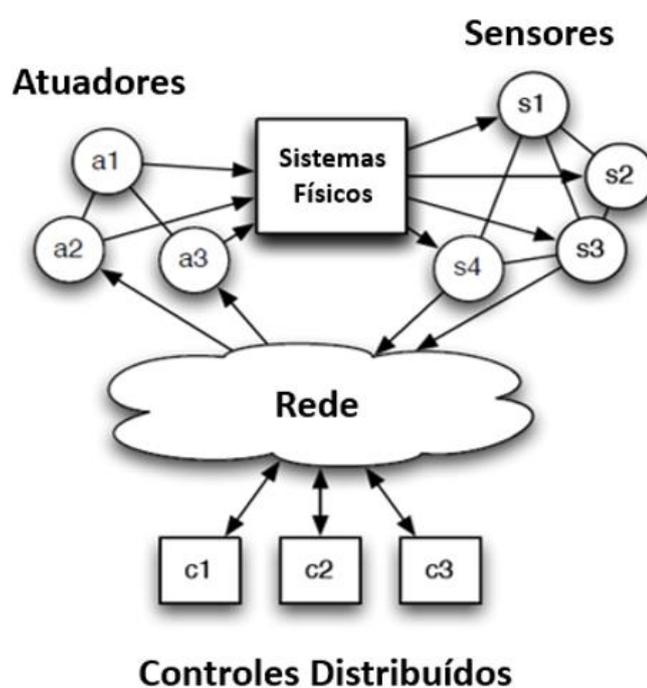


FIGURA 6 – CONFIGURAÇÃO CPS (ADAPTADO DE CARDENAS; AMIN; SASTRY, 2008)

O Quadro 1 apresenta uma síntese dos principais conceitos e definições sobre o CPS.

QUADRO 1 – SÍNTESE DOS CONCEITOS E DEFINIÇÕES SOBRE O CPS

<b>Autores</b>	<b>Ponto comum</b>	<b>Conceitos e definições</b>
Gonzales; Organero; Kloos (2008); Wang <i>et al.</i> (2009); Rajkumar <i>et al.</i> (2010).	Conjuntos de componentes em rede	O <i>CPS</i> consiste de um <b>conjunto de componentes em rede</b> , incluindo sensores, atuadores, unidades de processamento de controle e dispositivos de comunicação.
Marwedel (2010); He (2010); Kim; Kumar (2012); Liu <i>et al.</i> (2017a).	Sistemas embarcados	O <i>CPS</i> pode ser considerado uma junção de <b>sistemas embarcados</b> , sistemas em tempo real, sistemas de sensores distribuídos e controles.
Anderl (2014); Gunes <i>et al.</i> (2015); Bagheri <i>et al.</i> (2015); Thoben; Wiesner; Wuest (2017).	Internet	O <i>CPS</i> é definido como sistemas embarcados com capacidade de comunicação, preferencialmente através de <b>tecnologias de internet</b> .
Baheti; Gill (2011); Geisberger; Broy (2012); Mosterman; Zander (2016)	Interação homem-máquina	O <i>CPS</i> surge por meio de redes complexas e integração de sistemas embarcados, sistemas de aplicativos e infraestrutura, possibilitados pela <b>interação homem-máquina</b>

Portanto, a partir das definições apresentadas um sistema *CPS* caracteriza-se pela capacidade de coletar dados de si mesmo e de seu ambiente, processar e avaliar esses dados, conectar e se comunicar com outros sistemas, em especial através da internet, e possibilitar a interação homem-máquina.

### 2.2.2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES SOBRE SISTEMAS DE PRODUÇÃO FÍSICOS CIBERNÉTICOS

O desenvolvimento do *CPSS* é considerado uma etapa fundamental no desenvolvimento de sistemas de manufatura para a Indústria 4.0 (MONOSTORI, 2014), e normalmente inclui máquinas inteligentes, sistemas de armazenamento e outras instalações de produção (XU, 2017).

Rajkumar *et al.* (2010) e Acatech (2013) apresentam que o *CPPS*, contando com os avanços da ciência da computação, tecnologias da informação e comunicação, por um lado, e da ciência e tecnologia de manufatura, por outro, é o propulsor da Indústria 4.0.

A implementação do *CPPS* está levando a mudanças significativas, especialmente nos processos de fabricação e sistemas de controle de produção (GRÄBLER; PÖHLER, 2017; WU; GOEPP; SIADAT, 2019).

Assim, o *CPPS* aumenta a autonomia e a flexibilidade no ambiente industrial, permitindo um maior nível de integração e interoperabilidade nos sistemas de manufatura, otimização dos processos de produção, customização otimizada do produto, produção eficiente em termos de recursos, e processos de produção centrados no homem (RUDTSCH *et al.*, 2014; PEREZ *et al.*, 2015; XU, 2017).

Segundo Monostori (2014) e Monostori *et al.* (2016) o *CPPS* consiste de elementos e subsistemas autônomos e cooperativos que são conectados com base no contexto dentro e em todos os níveis de produção, desde os processos, passando pelas máquinas, até as redes de produção e logística.

Para a Acatech (2015) o *CPPS* compreende máquinas inteligentes, sistemas de armazenamento, e sistemas de produção que apresentam integração em toda a cadeia de valor, baseada em tecnologia da informação e computação.

Para Meissener, Hermann, Aurich (2019) o *CPPS* está relacionado à interligação das entidades do sistema de produção (por exemplo, máquinas), bem como ao controle descentralizado da produção.

Já Wu, Goepp, Siadat (2019) indicam que dois novos conceitos devem ser inseridos nas definições do *CPPS* apresentadas anteriormente: gestão do conhecimento e recursos humanos. Por um lado, a gestão do conhecimento é essencial para a tomada de decisões em uma melhoria contínua e automatizada das operações do *CPPS*. Por outro lado, embora o *CPPS* seja capaz de funcionar de maneira automática, os seres humanos devem ter um papel central

e principal, em vez de serem substituídos por tecnologias, visto que os seres humanos são os mais flexíveis e que podem lidar com situações excepcionais e controlar os sistemas quando necessário.

Ribeiro (2017), do mesmo modo, apresenta que um *CPPS* é uma composição de recursos humanos, equipamentos de produção e produtos agregados, para os quais se estabelece uma ou várias interfaces de interação físicos cibernéticas. Essas interfaces são usadas para monitorar e controlar as operações do *CPPS*, além de aproveitar o conhecimento gerado pelos recursos humanos e pelo equipamento durante o processo de produção, bem como o conhecimento gerado por seus produtos agregados ao longo de seu ciclo de vida.

### **2.2.3 ARQUITETURAS DO *CPPS***

Monostori (2014) apresenta que o *CPPS* quebra parcialmente a pirâmide de automação tradicional (lado esquerdo da Figura 7). Mesmo antes da Indústria 4.0, Vogel-Heuser *et al.* (2009) descreveram que a pirâmide de automação, que costumava ser o "senso comum" para a arquitetura de TI industrial e de automação, estava evoluindo para um novo tipo de arquitetura.

Como pode ser observado na Figura 7, no *CPPS* ainda existem os níveis típicos de controle em campo que incluem controladores lógico programáveis (*Programmable Logic Controller – CLP*) próximos aos processos técnicos para fornecer o melhor desempenho para malhas de controle críticas, enquanto, nos níveis mais altos da hierarquia, uma forma de funcionamento mais descentralizada é característica no *CPPS* (MONOSTORI, 2014).

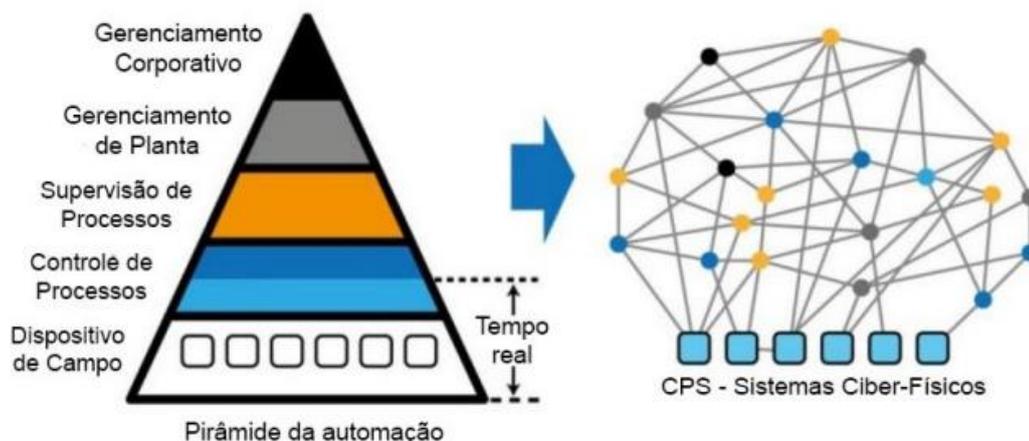


FIGURA 7 – MIGRAÇÃO DA PIRÂMIDE CLÁSSICA DA AUTOMAÇÃO PARA O CPPS (ADAPTADO DE VDI/VDE, 2013)

No que diz respeito à arquitetura do CPPS, Monostori *et al.* (2016) definem que o CPPS é globalmente caracterizado por três características principais: inteligência, conexão e capacidade de resposta às mudanças.

A Figura 8, apresentada por Cardin (2019), posiciona as principais características do CPS, apresentadas por Qi e He (2010), e integra os fundamentos do CPPS, definidas por Monostori *et al.* (2016), e expõe como todas essas características se inter-relacionam apresentando uma clara relação entre essas noções, cada uma em seu campo.



FIGURA 8 - RECURSOS BÁSICOS DE UM CPS E A ANALOGIA COM O CPPS. (ADAPTADO DE CARDIN, 2019)

Para Monostori *et al.* (2016), as três características principais do *CPPS*, apresentadas na Figura 8, são definidas por:

- **Inteligência:** os elementos são capazes de obter informações de sistemas e sensores e agir de forma autônoma;
- **Conectividade:** é a capacidade de configurar e usar conexões com os outros elementos do sistema, incluindo seres humanos, para cooperação, colaboração, conhecimento e serviços disponíveis na Internet;
- **Responsividade:** é a capacidade de resposta às mudanças internas e externas.

Outra arquitetura difundida é a do 5C do *CPS*, proposta por Lee, Bagheri, Kao (2015) e estendida ao *CPPS*. Ela é composta por cinco níveis aplicados nos sistemas de produção: Nível de Conexão, Nível de Conversão, Nível Cibernético, Nível de Cognição e Nível de Configuração. Essa classificação foi introduzida inicialmente para fornecer um tutorial passo a passo da implantação do *CPPS* (Figura 9), desde a detecção de funcionalidades até as funções que criam maior valor agregado (WU; GOEPP; SIADAT, 2019).

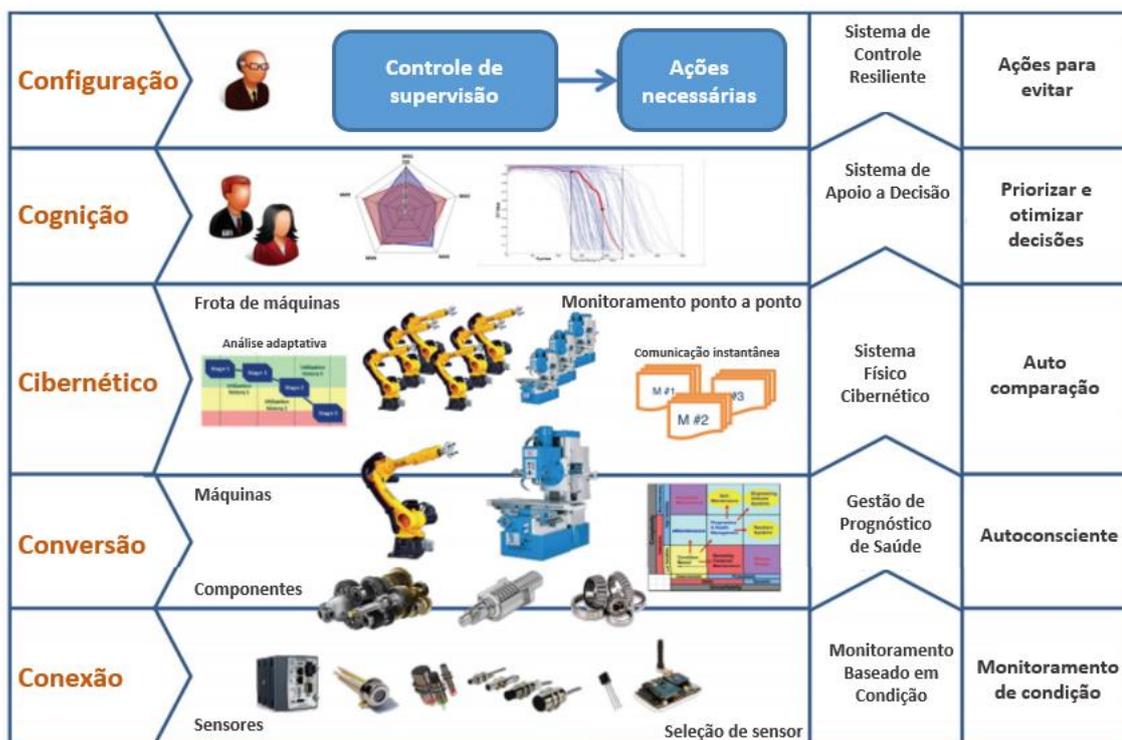


FIGURA 9 – APLICAÇÕES E TÉCNICAS ASSOCIADAS A CADA NÍVEL DA ARQUITETURA 5C NO CPPS (ADAPTADO DE LEE, BAGHERI, KAO, 2015)

No que diz respeito aos cinco níveis relacionados ao CPPS, as principais características são:

- **Nível Conexão Inteligente:**

Esse nível alcança integração entre diferentes elementos no espaço físico, como sensores, controladores e máquinas-ferramenta (WU; GOEPP; SIADAT, 2019).

Existem dois fatores importantes nesse nível para melhorar a implementação do CPPS: *i)* a comunicação no CPPS exige protocolos, interfaces e modelo de informações padrão. Um exemplo foi apresentado por Urbina *et al.* (2017), que estabelecem a comunicação com diferentes elementos, integrando diferentes interfaces e conexões a sensores e atuadores; *ii)* como diferentes elementos no CPPS são capazes de gerar grandes quantidades de dados sobre os processos de produção em

andamento, abordagens de aquisição de dados (SILVA *et al.*, 2017) e algoritmos de análise de dados (DENG *et al.*, 2017) são tópicos de pesquisa.

- **Nível Conversão de Dados**

Este nível converte dados em informações significativas. Considerando uma quantidade e complexidade crescente de dados, são propostas ferramentas e metodologias como processamento de dados (LEE *et al.*, 2018), análise via *big data* (POST *et al.*, 2017) e abordagens de mineração de dados para obter informações valiosas.

- **Nível Cibernético**

Esse nível é o que agrega as informações de várias fontes para formar um espaço cibernético. Alguns pesquisadores notaram a importância da rede colaborativa de manufatura. Mladineo *et al.* (2018), apresentam uma plataforma colaborativa inteligente para gerenciar a rede de produção. Com a tendência atual de maior conectividade com redes externas, os CPPS são cada vez mais alvo de ataques cibernéticos, portanto, a segurança cibernética é outra importante área de pesquisa (SANDOR *et al.*, 2017; KHALID *et al.*, 2018).

Além disso, o *gêmeo digital* é o foco de pesquisas nesse nível. O *gêmeo digital* é a virtualização dos recursos físicos no mundo cibernético. A ideia de um *gêmeo digital* é amplamente usada para simular propriedades e comportamentos dos sistemas. Bao *et al.* (2019), desenvolveram três *gêmeos digitais* (um produto, um processo e um *gêmeo digital* de operação) que podem simular o estado e o comportamento do objeto físico correspondente para otimizar os processos de produção, por exemplo.

- **Nível Cognição**

Como existem informações abundantes nesse tipo de ambiente integrado, esse nível pode gerar conhecimento abrangente do sistema. Nesse nível, o *CPPS* é capaz de diagnosticar seu próprio estado e prever a falha potencial, como apresentado em Niggemann e Frey (2015).

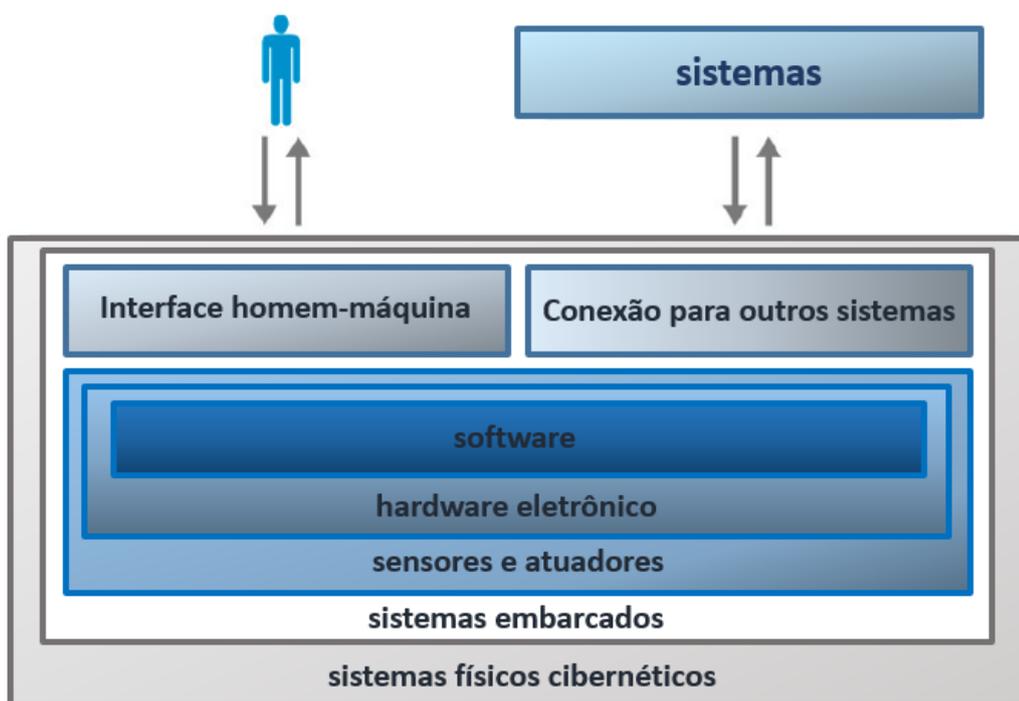
- ***Nível Configuração***

Pode aplicar as decisões corretas, tomadas no nível de cognição, ao espaço físico, implementando, portanto, um controle de resiliência. Ele pode obter controle e ajuste em resposta a mudanças ambientais externa. Como exemplo, Grundstein, Freitag e Scholz (2017) apresentaram um método de controle de produção autônomo aos processos de fabricação, que inclui todas as tarefas de controle e suas interdependências. O método apresentado atua de forma autônoma e mantém a resiliência do *CPPS*.

Outro fator importante ressaltado por autores no ambiente de produção físico cibernético é a interação entre humanos e máquinas.

No que diz respeito à gestão do conhecimento e recurso humanos, o *CPPS* permitirá e apoiará a comunicação entre humanos, máquinas e produtos. Os elementos de um *CPPS* são capazes de adquirir e processar dados, e podem autocontrolar determinadas tarefas e interagir com seres humanos por meio de interfaces (MONOSTORI, 2014).

A Figura 10 apresenta a estrutura de interação entre humanos e máquinas nos ambientes de produção físico cibernéticos (BRETTEL *et al.*, 2014).



*FIGURA 10 - INTERAÇÃO ENTRE HUMANOS E MÁQUINAS EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO CIBER-FÍSICOS (ADAPTADO DE BRETTEL ET AL., 2014)*

No presente, mais e mais pesquisadores começam a descobrir a importância dos seres humanos e reconhecem que os seres humanos devem ser elementos centrais no *CPPS* (WU; GOEPP; SIADAT, 2019). Os seres humanos incorporam a inteligência altamente desenvolvida, como compreensão, aprendizado e adaptação, que pode fornecer conhecimento de projeto para o *CPPS* (FRANCALANZA; BORG; CONSTANTINESCU, 2017; ENGEL; GREINER; SEIFERT, 2018).

No conceito do *CPPS*, as tarefas humanas serão diferentes. Os trabalhadores enfrentarão interfaces computadorizadas abundantes, tomarão decisões mais complexas e coordenarão a produção autônoma. Coletivamente, as tarefas de trabalho humano, as áreas de trabalho e as formas de interação com as máquinas serão diferentes. O objetivo do *CPPS* não é remover humanos, mas envolver completamente os humanos usando sua inteligência (WU; GOEPP; SIADAT, 2019).

Dworschak e Zaiser (2014) apresentam que a interação entre os seres humanos e o *CPPS* é de grande importância nos sistemas produtivos, sendo desde interações mais automatizadas às mais manuais; esta interação é subdividida nos seguintes modos:

- **Completa:** o ser humano tem apenas um papel de supervisão do *CPPS*, capaz de tomar todas as decisões necessárias sem qualquer intervenção do ser humano;
- **Automática:** o *CPPS* guia o humano durante sua tarefa, tomando a maioria das decisões e deixa as funções de adaptação ao humano;
- **Ferramenta:** o ser humano guia o *CPPS* e é responsável pela maioria das decisões;
- **Manual:** o *CPPS* fornece apenas dados ao humano, responsável por todas as decisões.

Para o presente trabalho, a definição para o *CPPS* a ser utilizada é a de um sistema que envolve seres humanos, máquinas e produtos e combina processos computacionais, de rede e físicos juntos no processo de produção, a fim de tornar a produção mais econômica e com produtos de alta qualidade.

#### **2.2.4 REQUISITOS PRESENTES NO *CPPS***

Nesta secção serão apresentados os requisitos presentes no *CPPS* obtidos na Revisão Sistemática da Literatura apresentada no item 4.1.2.

O Quadro 2 apresenta a síntese dos requisitos do *CPPS*, sendo estes subdivididos em requisitos tecnológicos e de gerenciamento de operações

QUADRO 2 – REQUISITOS PRESENTES NO CPPS

<b>Grupo</b>	<b>Requisitos tecnológicos presentes no CPPS</b>
Integração	Complexidade, Heterogeneidade, Robustez, Interoperabilidade, Comunicação e conectividade, Capacidade de redes, Interação, Orientação de Serviços, Modularidade, Autonomia, Auto capacidades, Descentralização.
Inteligência	Inteligência, Virtualização, Capacidade em tempo real, Visibilidade em tempo real, Capacidade computacional, Conscientização do contexto, capacidade de detecção, Capacidade cognitiva, Capacidade de atuação.
Cooperação	Cooperação, Colaboração
Segurança	Segurança, Confiabilidade
<b>Grupo</b>	<b>Requisitos de gerenciamento de operações da fábrica inteligente baseada em CPPS</b>
Reconfigurabilidade	Reconfigurabilidade dinâmica, Adaptabilidade, Escalabilidade, Conversabilidade, Previsibilidade

A seguir serão descritas as definições dos requisitos presentes no CPPS.

- **Integração**

O CPS é de fato a integração de computação e processos físicos. Portanto a integração é uma questão necessária e desafiadora para o CPS (MOURTZIS; VLACHOU, 2018).

A integração é obtida por meio de requisitos que serão apresentados a seguir.

- *Complexidade*

Na fabricação, a complexidade do *CPS* é devida à natureza diferente de seus elementos. O *CPS* geralmente é equipado com sistemas embarcados (software e hardware) capaz de gerar, comunicar e avaliar grandes quantidades de dados sobre os processos de produção em andamento (ILSEN; MEISSNER; AURICH, 2017).

Sha *et al.* (2009) apresentam que o *CPS* compreende sistemas em tempo real e a complexidade da verificação das especificações da lógica temporal é exponencial, e, portanto, é necessário o desenvolvimento de uma arquitetura de sistema físico cibernético na qual os serviços críticos de segurança de *CPS* grandes e complexos possam ser garantidos por um pequeno subconjunto de módulos e suas interações.

- *Heterogeneidade*

Segundo Yuan, Anumba e Parfitt (2015) o *CPS* é um sistema heterogêneo porque integra vários sistemas diferentes, juntamente com a comunicação padrão e a troca de informações. Ele integra vários dispositivos, incluindo sensores, dispositivos móveis, estações de trabalho e servidores.

O *CPS* sobretudo é um sistema heterogêneo devido à dinâmica física constituinte, elementos computacionais, lógica de controle e implantação de diversas tecnologias de comunicação. Os dispositivos são interconectados em sistemas abertos cada vez mais complexos com um estilo *plug and play*<sup>1</sup>, o que torna crucial uma rede de controle heterogênea e um controle de circuito fechado de dispositivos interconectados (GUNES *et al.*, 2015).

---

<sup>1</sup> *Plug And Play*: Na computação, este tipo sistema ou dispositivo relaciona-se a capacidade de se conectarem sem a necessidade de configuração de dispositivo físico ou a intervenção do usuário na resolução de conflitos de comunicação (LINS *et al.*, 2020).

No *CPS* a heterogeneidade causa grandes desafios para o projeto de composição de sistemas de grande escala, incluindo problemas fundamentais causados por incertezas de rede, como atraso variável no tempo, limitações de taxa de dados e perda de pacotes (WAN *et al.*, 2011).

- *Robustez*

Desde o surgimento do *CPS*, Lee (2008) apresenta que estes sistemas não estarão operando em um ambiente controlado e devem ser robustos a condições inesperadas e adaptáveis a falhas do subsistema.

Rungger e Tabuada (2016) apresentam que a robustez se refere à capacidade de um sistema manter sua configuração estável e resistir a quaisquer falhas. Um sistema altamente robusto deve continuar a operar na presença de qualquer falha sem alterações fundamentais em sua configuração original e evitar que essas falhas dificultem ou interrompam sua operação.

Sha *et al.* (2009) e Dumitrescu, Juergenhake, Gausemeier (2012) apresentam que uma das características principais do *CPS* é a necessidade de robustez do sistema para operar em um ambiente dinâmico e lidar com incertezas.

- *Interoperabilidade*

A interoperabilidade representa a capacidade de dois sistemas se conectarem, trocarem dados, compartilharem informações, conhecimentos e usar as funcionalidades um do outro (STOCK; SELINGER, 2016; GHOBAKHLOO, 2018).

Mourtizis e Vlachou (2018) apresentam que um sistema altamente interoperável deve fornecer ou aceitar serviços que leva a uma comunicação e interoperação eficazes entre os componentes do sistema.

No *CPS* há uma variedade de dispositivos, incluindo sensores, processadores, memória, etc. Esses dispositivos podem vir de diferentes fabricantes. Eles

podem usar instruções diferentes e dependem de diferentes sistemas operacionais (LIU *et al.*, 2017a).

Um fator crítico para a interoperabilidade é a padronização, porque os componentes precisam se comunicar e entender entre si, semelhantes ou não (RUPPERT *et al.*, 2018).

Ghobakhloo (2018) enfatizou que a interoperabilidade difere da padronização dos dados, pois se preocupa com o significado do conteúdo dos dados e como os diferentes componentes de um sistema podem se comunicar e entender o significado dos dados e tomar uma decisão com base neles.

Segundo Leitão *et al.* (2015), em sistemas heterogêneos de CPS, a interoperabilidade e a compreensão do conhecimento compartilhado são um aspecto importante. Para esse fim, devem ser considerados padrões de interoperabilidade, troca de informações e interfaces com sistemas legados.

Tendo preocupações semelhantes, a interoperabilidade do CPS permite reduzir alguns custos relevantes dos sistemas de fabricação, evitando o esforço de criar uma integração personalizada de seus componentes (FERRER *et al.*, 2016).

O desenvolvimento de CPS na manufatura requer a obtenção de interoperabilidade, como requisito base para trocas de informações entre CPS. Em outras palavras, a interoperabilidade permite o desenvolvimento da comunicação e conectividade do CPS. De fato, esses sistemas se conectam entre si e com os humanos se comunicando por meio de interfaces padrão (CARDIN, 2019).

- *Comunicação e conectividade*

A característica de comunicação ou de conectividade equivalente do CPS garante a aquisição em tempo real de dados do mundo físico e o feedback de informações do espaço cibernético (LIU *et al.*, 2017b; YU *et al.*, 2017).

De fato, o *CPS* consiste em entidades conectadas, com base no contexto, dentro e em todos os níveis das atividades de produção, desde a operação da máquina, controle de processos até redes de produção e logística completas (UPASANI *et al.*, 2017; TU; LIM; YANG, 2018).

A comunicação entre os *CPS* pode depender da Internet e, nesse caso, quando envolvem a Internet, os *CPS* são sistemas *IoT*, sistemas nos quais os componentes fornecem dados pela Internet. Assim, a *IoT* é um importante facilitador dos *CPS* (WANG; TORNGREN; ONORI, 2015; ISAKSSON; HARJUNKSKI; SAND, 2017; TEDESCHI *et al.*, 2018).

Tedeschi *et al.* (2018) observaram que a *IoT* é uma tecnologia importante e inovadora usada para definir protocolos da Internet para permitir a comunicação entre máquinas, dispositivos, objetos e sensores.

De acordo com Isaksson, Harunkoski e Sand (2017), a *IoT* significa que qualquer dispositivo pode ser conectado à Internet, permitindo comunicações bidirecionais ou entre sistemas de produção, isso disponibiliza novos dados também nas operações e suporta aplicações mais horizontais com tomada de decisão descentralizada.

Contando com a infraestrutura fornecida pela *IoT*, o *CPS* pode compartilhar e analisar dados e, com base no que aprendem, podem enviar comandos de controle para recursos físicos, monitorando e controlando os processos físicos (WANG; TORNGREN; ONORI, 2015).

Para Woo *et al.* (2018) e Lu e Xu (2019), a conectividade permite que os objetos de fabricação configurem e usem conexões com outros objetos de um sistema.

Nos sistemas produtivos, por meio de conexões de internet com sensores e outros dispositivos, o *CPS* dispõe de capacidade para obter informações disponíveis em sistemas de software (como *ERP*, *MES*) e na Internet, e, assim, adaptar-se e otimizar-se (GRÄBLER; PÖHLER, 2017).

- *Capacidade de redes*

O *CPS* deve ser composto de *clusters*<sup>2</sup> interconectados de elementos de processamento e elementos físicos em redes, com e sem fio, em larga escala e através de uma variedade de sensores e atuadores, com o objetivo de construir inteligência em diferentes campos. A conexão desses campos geralmente depende da Internet (RAJKUMAR *et al.*, 2010; WANG; HAGHIGHI, 2016).

O *CPS* depende de uma rede de comunicação subjacente para transportar pacotes de dados entre sensores, unidades computacionais e atuadores. Para que as ações sejam realizadas a tempo, esses pacotes precisam ser entregues dentro de um prazo determinado. Assim, o *CPS* necessita de uma rede de comunicação em tempo real que possa fornecer garantias sobre as taxas de transferência e os atrasos dos fluxos (KIM; KUMAR, 2012).

A capacidade de rede é possibilitada pelas características de interoperabilidade, comunicação e conectividade, que garante, que os dados de detecção, possam ser entregues com sucesso de cada sensor para nós de rede específicos (ALI *et al.*, 2015; TRAPPEY *et al.*, 2017).

- *Interação*

Para Lee e Seshia (2011) o *CPS* trata da intersecção, não da união, do mundo físico e cibernético; portanto, não é suficiente entender separadamente os componentes físicos e computacionais. Em vez disso, deve-se entender sua interação.

Ao contrário dos sistemas embarcados tradicionais, que se concentram principalmente em elementos de computação, o *CPS* leva em consideração, principalmente, a interação entre os elementos físicos no mundo real e os elementos computacionais no espaço cibernético (PARK, 2012).

---

<sup>2</sup> Um **cluster** é um conjunto de computadores interconectados que funcionam como se fosse apenas um grande sistema (WU; KAO; TSENG, 2011).

Wan *et al.* (2010) apresentam que o *CPS* deve interagir continuamente com o mundo físico; o comportamento de um *CPS* deve mudar para manter a operação ideal diante de mudanças nas condições ambientais e nos contextos operacionais.

De acordo com Prause e Weigand (2016), Rama *et al.* (2016), Yu *et al.* (2017) diferentes tipos de interação devem ser possíveis nos *CPS*: humano para humano, máquina para máquina e humano para máquina/robô/sistema.

Emmanouilidis *et al.* (2019), apresentam que a integração humana em ambientes industriais está recebendo crescente atenção, com termos como "Operador 4.0" usados para denotar a relação do operador com as tecnologias da Indústria 4.0. Por esse motivo, a interação homem-máquina é essencial nos *CPPS*.

No *CPPS* as tarefas humanas serão diferentes. Os trabalhadores enfrentarão interfaces computadorizadas abundantes, tomarão decisões mais complexas e coordenarão a produção autônoma. Coletivamente, as tarefas de trabalho humano, as áreas de trabalho e as formas de interação com as máquinas serão diferentes. O objetivo do *CPPS* não é remover humanos, mas envolver completamente os humanos usando sua inteligência (WU; GOEPP; SIADAT, 2019).

- *Orientação de serviços*

Através da interconexão e comunicação, tarefas complexas de fabricação podem ser realizadas de forma colaborativa por vários serviços de fabricação (GHOBAKHLOO, 2018).

No *CPS*, os aspectos cibernéticos também incluem serviços digitais encapsulados em arquiteturas orientadas a serviços (TAO; QI, 2019).

Em uma estrutura orientada a serviços, a funcionalidade implementada por cada entidade é facilmente acessível para as demais. Além disso, seguir as restrições orientadas a serviços ao desenvolver a lógica de controle de um sistema é uma

maneira de lidar com a complexidade da integração (KRUEGER *et al.*, 2016; IAROVYI *et al.*, 2016).

Yuan, Anumba e Parfitt (2015) se referiram à capacidade do CPS de fornecer serviços oportunos, a fim de lidar com restrições em tempo real.

De uma perspectiva diferente, outra marca da orientação a serviços é o crescimento esperado para os mercados de serviços/aplicativos destinados à manufatura inteligente (THOBEN; WIESNER; WUEST, 2017).

Os mercados de aplicativos/serviços ganharam atenção significativa pois oferecem flexibilidade, enquanto os avanços na computação em nuvem e na fabricação em nuvem apoiam essa afirmação (KULVATUNYOU; IVEZIC; SRINIVASAN, 2016).

Portanto, mercados de aplicativos/serviços flexíveis que oferecem um conjunto de aplicativos principais e permitem que os usuários, ou terceiros independentes, desenvolvam aplicativos personalizados com foco em certos problemas no domínio da fabricação inteligente, são desejados por indústrias e pesquisadores (KULVATUNYOU *et al.*, 2016).

- *Modularidade*

Modularidade é a capacidade de um CPS ser alterado com flexibilidade e reconfigurado em resposta às mudanças rápidas nas necessidades dos clientes e nas mudanças de produtos (ROSENBERG *et al.*, 2015; WANG, 2016). Assim, a modularidade permite a independência do sistema, tornando-o capaz de adaptar de forma flexível (LEE *et al.*, 2018).

Portanto, a modularidade é outro importante facilitador do CPS, e que de acordo com Lins *et al.* (2020), para possibilitar sua adaptabilidade, o CPS deve ser

desenvolvido de maneira *plug and work*<sup>3</sup>, por exemplo, agregando módulos de sistema e componentes de máquina predefinidos (como robôs, transportadores e máquinas CNC).

A modularidade permite a autonomia do *CPS*, ou seja, a capacidade de perceber e interagir autonomamente com seu ambiente físico ao longo de seu ciclo de vida (PEREIRA; ROMERO, 2017).

- *Autonomia*

Fettermann *et al.* (2018) associam a autonomia à capacidade do *CPS* de aprender e se adaptar independentemente ao meio ambiente.

Liu *et al.* (2017b) definem que a autonomia do sistema é uma das características mais representativas do *CPS*. O sistema pode responder às mudanças do ambiente externo e dar a resposta apropriada a tempo de modo a assegurar o funcionamento normal do sistema. E esse tipo de reação pode ser realizado pela intervenção humana.

Segundo Ribeiro e Bjorkman (2018), o *CPS* é uma entidade complexa e em evolução, com alto grau de autonomia. Essa autonomia deve ser projetada adequadamente para garantir a resposta adaptativa às perturbações dos componentes, permitindo que eles se recuperem de alterações localizadas.

- *Autocapacidades*

Segundo Chen e Xing (2015), a autonomia permite as autocapacidades dos *CPSs*. As instâncias de autocapacidades são: autoadaptabilidade,

---

<sup>3</sup> ***Plug and work***: é definido como a capacidade de um sistema de produção, identificar automaticamente um componente novo ou modificado, e integrá-lo corretamente ao processo de produção em execução sem esforços manuais e mudanças dentro do projeto ou implementação dos demais (SAUER; EBEL, 2007).

autorreconfiguração, auto-organização, autoconsciência, autoaprendizagem, autodiagnóstico, auto-otimização.

- *Descentralização*

Descentralização significa ter o *CPS* trabalhando de forma independente e tomando decisões de forma autônoma, de maneira que permaneçam alinhados ao objetivo organizacional final (ROSENBERG *et al.*, 2015; ALLENHOF, 2015; GHOBAKHLOO, 2018).

A distribuição, como sinônimo de descentralização, tem sido frequentemente referida ao sistema de controle para tomada de decisão do *CPS* (TRAPPEY *et al.*, 2016; MOGHADDAM *et al.*, 2018). Os componentes de um sistema distribuído estão localizados em computadores em rede, comunicando e coordenando suas ações através da troca de informações para atingir objetivos comuns (MORA *et al.*, 2017).

Rosenberg *et al.* (2015) e Allenhof (2015) apresentam que a descentralização é a capacidade do *CPS*, empregado nas fábricas inteligentes, em tomar decisões por conta própria.

- *Inteligência*

Monostori (2015) se refere à capacidade de inteligência do *CPPS* como parte do gerenciamento, análise e computação de dados.

Tang *et al.* (2017) apresentam que o *CPS* traz recursos de computação e comunicação aos componentes físicos para criar inteligência. Essa inteligência é distribuída entre as entidades envolvidas no processo.

Cheng *et al.* (2016) apresentam que o *CPS* engloba características de inteligência, pois são capazes de serem identificados, detectando eventos, interagindo com outras pessoas e tomando decisões.

Mais especificamente, Tu, Lim e Yang (2018) apresentam que um *CPS* pode usar sensores e atuadores para coletar informações sobre as operações físicas em tempo real e conduzir um controle inteligente sobre os sistemas físicos para se adaptar às mudanças nas condições e no ambiente.

Segundo Lin e Panahi (2010) e Monostori (2015) a inteligência está associada às características de virtualização, capacidade em tempo real e a capacidade computacional. De fato, o *CPS* explora a digitalização e a capacidade em tempo real para coletar e monitorar informações sobre o processo físico em tempo real, assim, trazem os recursos de computação para processar informações e criar inteligência.

- *Virtualização ou Gêmeo Digital*

Allehof (2015); Rosenberg *et al.* (2015) e Wang (2016), descrevem a virtualização como a capacidade de vincular dados de sensores a modelos de fábrica virtual e modelos de simulação. Em outras palavras, a virtualização consiste em criar uma cópia virtual do mundo físico real e permanecer conectado a ele ao longo do tempo.

A virtualização permite que o *CPS* analise e rastreie remotamente processos físicos, simulem comportamentos e, em alguns casos, permitam um *feedback* de comunicação do mundo digital para o campo (YUAN; ANUMBA; PARFITT, 2015; BABICEANU; SEKER, 2016; KRITZIGER *et al.*, 2018).

Ghobakhloo (2018) observou que a virtualização permite a replicação de um “gêmeo digital” de toda a cadeia de valor (armazém inteligente, fábrica inteligente, todos os equipamentos e máquinas relacionados e até produtos inteligentes).

Sanderson, Chaplin e Ratchev (2018) descrevem que o “gêmeo digital”, suportado pela conscientização de contexto, permite que todos os elementos da fábrica sejam totalmente rastreáveis por todos os seus ciclos de vida, garantindo a chamada continuidade digital dos dados sobre os sistemas.

De maneira mais abrangente, Cimino, Negri e Fumagalli (2019) definiram gêmeos digitais como ambientes de simulação hospedados ou conectados à parte cibernética do CPS. Para eles, esses ambientes não apenas devem permitir que o CPS monitore os recursos físicos, mas também que atue nesses recursos com base nos resultados das simulações.

A virtualização e a capacidade em tempo real são características complementares. De fato, o “gêmeo digital” é uma réplica digital do sistema real, e deve permitir a visualização em tempo real e a resposta sobre o estado atual dos componentes de fabricação, para fornecer instantaneamente os resultados derivados (YOON; SUH, 2016; SANDERSON; CHAPLIN; RATCHEV, 2018).

- *Capacidade em tempo real*

A capacidade em tempo real é a capacidade do CPS de adquirir e analisar dados em tempo real sobre equipamentos, qualidade e matérias-primas e fornecer a informação imediatamente (ROSENBERG *et al.*, 2015; HOFMANN; RUSCH, 2017).

Esta característica é fundamental, pois permite que o CPS detecte qualquer alteração nos processos físicos e reaja em tempo real para garantir os requisitos funcionais e de segurança do sistema. Assim, a capacidade em tempo real também pode implicar em ações físicas para evitar falhas (ETXEBERRI-AGIRIANO; NOGUERO; ZULUETA, 2012; GUZMAN *et al.*, 2019).

O CPS também enfatiza as operações em tempo real. A detecção, o processamento, a comunicação e a atuação nos circuitos de controle são tratados por diferentes componentes da rede (BECHER, 2015).

No CPS, o tempo necessário para executar uma tarefa pode ser crítico para corrigir o funcionamento do sistema (DERLER; LEE; VINCENTILLI, 2012).

- *Visibilidade em tempo real*

Vale ressaltar que a capacidade em tempo real também inclui a visibilidade em tempo real. De fato, em um *CPS*, o status atual dos componentes de fabricação pode ser determinado e visualizado em tempo real (YOON; SUH, 2016).

Chen e Tsai (2017) se referiram à aplicação de Identificação por Rádio Frequência (*Radio Frequency Identification – RFID*) na fabricação, para desenvolver características essenciais, como rastreamento de objetos em tempo real e maior visibilidade de ativos.

- *Capacidade computacional*

As definições fornecidas para essa característica são todas referentes ao gerenciamento e análise de dados realizados com métodos/técnicas de diferentes domínios (como ciência da computação e estatística). Portanto, as partes cibernéticas do *CPS* deve ser capaz de executar uma quantidade significativa de trabalho de computação e controle realizado anteriormente por seres humanos, e hoje também fortalecidas pela possibilidade de compartilhar dados e interagir entre si (MORA *et al.*, 2017; JI *et al.*, 2019).

Além disso, o *CPS* pode executar a computação em qualquer local, daí o conceito de computação ubíqua<sup>4</sup> (CHEN; TSAI, 2017). Um facilitador dessa capacidade computacional do *CPS* é a computação em nuvem (JAKOVLEJEVIC; VIDOSAV; STOJADINOVIC, 2017; SUNNY; LIU; SHAHRIAR, 2018).

De fato, as tecnologias em nuvem fornecem um ambiente para conectar e compartilhar recursos distribuídos de manufatura, incluindo ferramentas de conhecimento, computação e software, bem como recursos físicos via infraestrutura de rede da Internet (CAGGIANO, 2018).

---

<sup>4</sup> *Computação ubíqua*: ou computação pervasiva é um termo usado para descrever a onipresença da informática no cotidiano das pessoas (ZHOU; LIU; ZHOU, 2015).

- *Conscientização do contexto*

Um *CPS* ciente do contexto deve auxiliar pessoas e máquinas na execução de suas tarefas através da exploração de sensores e atuadores para desencadear ações baseadas no contexto ambiental. Assim, o sistema deve ter consciência do estado atual do processo de produção (TSAI; LLU, 2018).

- *Capacidade de detecção*

Para poder perceber o contexto, é necessária a capacidade de detecção, que depende da presença de sensores. De acordo com Wu, Terpenney e Schaefer (2017), vários tipos de sensores devem ser adotados em aplicações inteligentes de *CPS*, esses dados de detecção de domínio cruzado são trocados por uma rede heterogênea.

- *Capacidade cognitiva (ou de aprendizado)*

A capacidade cognitiva é considerada como a capacidade de conhecimento, pensamento e processamento de informações do *CPS* tipicamente em relação à assistência de seres humanos no ciclo de tomada de decisão (CHEN *et al.*, 2018).

- *Capacidade de atuação*

A capacidade de atuação adiciona a implementação de ações em resposta a problemas do processo no ambiente físico. Chen, Xing (2015) apresentam, como forma de exemplo, que robôs cognitivos, podem perceber incerteza de informações, alterar o gerenciamento de agendamento e ajustar o comportamento da manufatura para lidar independentemente com um problema de manufatura complexo.

Thoben, Wiesner, Wuest (2017) apresentam que um *CPS* robótico permite uma colaboração humano-robô segura, sem qualquer proteção através de características de planejamento dinâmico de tarefas, prevenção ativa de colisões e controle adaptativo na presença de seres humanos.

- **Cooperação, Colaboração**

A seguir serão apresentadas as características referentes à cooperação e colaboração dos sistemas de produção físicos cibernéticos.

- *Cooperação*

Os *CPS* cooperam dentro do chão de fábrica para executar tarefas: eles podem se controlar para se adaptar às mudanças, bem como cooperar com outros *CPS* para realizar atividades específicas (TRAN *et al.*, 2019).

Segundo Etxeberria-Agiriano, Noguero e Zulueta (2012), cooperação é a capacidade de um sistema distribuído com subsistemas autônomos de decidir dinamicamente quais componentes executarão uma determinada tarefa, a fim de otimizar desempenhos como o tempo de resposta.

De fato, uma boa combinação de autonomia e cooperação de *CPS* confere características específicas às fábricas inteligentes, como auto-organização e automanutenção (TRAN *et al.*, 2019; PANETTO *et al.*, 2019).

- *Colaboração*

Muitos autores especificaram a inclusão do ser humano nesse processo de cooperação/colaboração entre os elementos da fábrica (WANG; TÖRNGREN; ONORI, 2015; POSADA *et al.*, 2015; TU; LIM; YANG, 2018).

Em geral, em caso de colaboração, as partes envolvidas compartilham informações, recursos e responsabilidades para planejar, implementar e avaliar em conjunto o grupo de atividades necessárias para alcançar um objetivo comum (NOF *et al.*, 2015).

Wang, Torngren e Onori (2015) se referem à colaboração simbiótica homem-robô, que combina a flexibilidade dos seres humanos e a precisão das máquinas, à possibilidade de os seres humanos instruírem os robôs através da fala, sinais e gestos e a possibilidade de os robôs ajudarem os humanos na implementação

de tarefas. Eventualmente, a colaboração depende da capacidade de compartilhar informações de fabricação entre diferentes partes interessadas em diferentes locais.

Autores apresentam que a colaboração entre humanos e máquinas é projetada não para substituir, mas para aumentar as habilidades e competências dos seres humanos, de modo a melhorar a produtividade e a eficácia dos recursos (MONOSTORI, 2014; WANG; TÖRNGREN; ONORI, 2015; ROMERO *et al.*, 2016; MONOSTORI *et al.*, 2016).

- **Segurança e Confiabilidade**

A seguir serão apresentadas as características referentes à segurança e confiabilidade dos sistemas de produção físicos cibernéticos.

- *Segurança*

A segurança é um aspecto crítico de qualquer sistema em que um dano físico possa ser causado (KIM; KUMAR, 2012; LIU *et al.*, 2017c).

Segundo Perez *et al.* (2015) o CPS está sujeito a falhas e ataques nos aspectos físico e cibernético, devido a sua escalabilidade, complexidade e natureza dinâmica.

Para Sha *et al.* (2009) a incerteza no ambiente, os ataques de segurança e os erros nos dispositivos físicos e na comunicação sem fio representam um desafio crítico para garantir a robustez, segurança e proteção gerais do sistema.

Cardenas, Amin e Sastry (2008) apresentam que o CPS deve ser projetado para satisfazer determinados objetivos operacionais, como estabilidade em circuito de malha fechada, atividade ou otimização de uma função de desempenho, e objetivos não operacionais, relacionados a proteção de acesso de informações confidenciais coletadas pelas redes de sensores, por exemplo.

À medida que a tecnologia avança, o *CPS* se torna suscetível a uma ampla gama de ataques cibernéticos. Na manufatura, esses ataques representam uma ameaça significativa para garantir que os produtos estejam em conformidade com a intenção original do projeto e para manter a segurança dos equipamentos, funcionários e consumidores. Pensando nos sistemas de manufatura, um ataque cibernético pode alterar arquivos de projeto ou parâmetros de processo, como por exemplo, o trajeto de ferramentas programado. Além disso, esse ataque também pode alterar os parâmetros do sistema de controle de qualidade interferindo na avaliação adequada da qualidade. Tais ataques podem interromper o processo de projeto do produto/sistema e/ou afetar adversamente a finalidade, o desempenho ou a qualidade do projeto de um produto. Mais importante, esses ataques representam um risco para a segurança humana de operadores e consumidores (WELLS *et al.*, 2014).

A conexão do sistema de produção com a Internet e o aumento da troca de informações também implicam problemas de segurança e levam ao desaparecimento das fronteiras entre a Internet e a tecnologia de comunicação do sistema de produção e os outros sistemas de TI. Além disso, a quantidade de dados disponíveis aumenta continuamente à medida que as máquinas coletam e compartilham mais dados, isso leva a um aumento total dos riscos, especialmente a manipulação de produtos, máquinas e assim por diante. Além disso, essa condição é propensa a que os dados sejam acessados por pessoas não autorizadas, levando à perda de conhecimento. Para diminuir esse risco, a segurança cibernética deve ser considerada com cuidado no contexto da Indústria 4.0 e dos *CPPS* (ECKERT, 2017).

Outro fator relacionado à segurança é a integridade de um sistema, que segundo Griffioen *et al.* (2019) refere-se à propriedade de um sistema proteger as informações internamente, de possíveis manipulação ou modificação não autorizada para preservar a exatidão das informações. A integridade é uma das propriedades importantes de um *CPS*, portanto, precisam ser desenvolvidos com maior segurança, fornecendo mecanismos de verificação de integridade.

A confidencialidade dos dados, também relacionada à segurança, refere-se à propriedade de permitir que apenas as partes autorizadas acessem informações confidenciais geradas dentro do sistema. Um sistema confidencial deve empregar os métodos mais seguros de proteção contra acesso não autorizado, divulgação ou adulteração. A confidencialidade dos dados é uma questão importante que precisa ser satisfeita na maioria das aplicações do CPS (VUONG; LOUKAS; GAN, 2015).

- *Confiabilidade*

A realidade física do mundo está sempre mudando, e um CPS está trabalhando em tal ambiente, portanto, o CPS deve ter a capacidade de lidar com a situação inesperada e a falha do subsistema e prover a confiabilidade do processo (LIU *et al.*, 2017c).

A confiabilidade refere-se à propriedade de um sistema em executar as funcionalidades necessárias durante sua operação, sem comprometer de forma significativa seu desempenho e resultado (DENKER *et al.*, 2012).

A confiabilidade reflete o grau de confiança depositado em todo o sistema, nesse caso, um sistema altamente confiável deve operar adequadamente sem intrusão, fornecer serviços solicitados conforme especificado e não falhar durante sua operação (WAN *et al.*, 2013).

Considerando o fato de que os CPSs devem operar de maneira confiável em ambientes abertos, em evolução e incertos, torna-se necessário quantificar estas incertezas durante o projeto do CPS. Essa análise de incerteza resulta em uma caracterização efetiva da confiabilidade do CPS (ACATECH, 2011).

Garantir a confiabilidade antes da operação real do sistema é uma tarefa complexa de ser realizada. Por exemplo, as incertezas de tempo em relação às leituras do sensor e à atuação imediata podem comprometer a confiabilidade e levar a consequências imprevistas. Os componentes cibernéticos e físicos do sistema são inerentemente interdependentes e os componentes subjacentes

podem ser dinamicamente interconectados durante a operação do sistema, o que, em contrapartida, torna a análise de confiabilidade muito difícil (WEYER *et al.*, 2016).

- **Reconfigurabilidade dinâmica**

A reconfigurabilidade refere-se à propriedade de um sistema em alterar suas configurações em caso de falha ou em solicitações internas ou externas. Um sistema altamente reconfigurável deve ser autoconfigurável, ou seja, capaz de ajustar-se dinamicamente e coordenar a operação de seus componentes (SANJAY; ERONU, 2012).

Para Penas *et al.* (2017) a reconfigurabilidade dinâmica refere-se às características que permitem uma rápida resposta às mudanças e distúrbios do processo. Nesta perspectiva, o CPS permite obter um processo reconfigurável.

Especificamente, o CPS pode evoluir ao longo do tempo através da reconfiguração dinâmica de suas estruturas, ele também pode reorganizar suas funcionalidades, mudar comportamentos e modificar seus limites (IVANOV; SOKOLOV; IVANOVA, 2016).

Conforme apresentado por Liu *et al.* (2017d) se um sistema CPS não tiver a capacidade de se reconfigurar dinamicamente no ambiente, o mesmo pode se tornar instável e inseguro, haja vista que cada vez mais os processos e recursos estão sendo integrados.

- *Adaptabilidade*

Adaptabilidade refere-se à capacidade de um sistema de alterar seu estado ajustando sua própria configuração em resposta a diferentes circunstâncias no ambiente (WONG *et al.*, 2012).

No que diz respeito ao CPS, a adaptabilidade é a capacidade de se adaptarem a situações que mudam rapidamente e novos requisitos (como novos produtos

ou variantes de produtos) por meio de reconfiguração dinâmica (YUAN; ANUMBA; PARFITT, 2015; OTTO; VOGEL-HEUSER; NIGGEMANN, 2018).

Para esse fim, alguns autores observaram que a adaptabilidade depende da auto-organização, aprendizado e capacidade de evolução do CPS (PIRVU; ZAMFIRESCU; GORECKY, 2016; PANETTO *et al.*, 2019).

A adaptabilidade é especialmente necessária no caso de ambientes dinâmicos e turbulentos (LANZA; STRICKER; MOSER, 2013; IAROVYI *et al.*, 2016).

Rosenberg *et al.* (2015) e Panetto *et al.* (2019) referiram-se à adaptação flexível de fábricas inteligentes a requisitos variáveis, substituindo ou expandindo módulos individuais.

Ribeiro e Bjorkman (2018) observaram que o recurso de projeto mais importante para obter adaptabilidade é dotar os componentes em cada nível de autonomia suficiente para aprovar uma resposta adaptativa a distúrbios, permitindo que eles lidem com mudanças localizadas sem precisar confiar em componentes em um nível superior.

- *Escalabilidade*

Baseando-se na modularidade lógica e física dos componentes do sistema e na padronização das interfaces entre esses módulos, o CPS deve ser escalável (RIBEIRO; HOCHWALLNER, 2018; RIBEIRO; BJORKMAN, 2018).

Segundo Heiss *et al.* (2015), a escalabilidade permite alterar a capacidade de produção de um sistema rapidamente e com pouco esforço. Refere-se à capacidade do CPS em altera-se durante seu ciclo de vida, devido a um número crescente ou reduzido de "nós" (os nós podem ser sistemas físicos participantes, gerenciados, subsistemas ou componentes do CPS).

Segundo Garcia-Valls *et al.* (2017) a escalabilidade significa que o CPS deve conter a lógica necessária para lidar com aspectos como mover "nós", unir e removê-los.

Dependendo de sua escala, Gunes *et al.* (2015) apresentam que o CPS pode incluir milhares de computadores, sensores e atuadores incorporados que devem trabalhar juntos de forma eficaz.

- *Conversabilidade*

A conversabilidade pode ser descrita como a capacidade do CPS de estender a funcionalidade geral do sistema, adicionando com relativa facilidade novas funções, suportadas por sistemas modulares de execução de fabricação capazes de informar sobre o estado atual e suportar melhores decisões (IAROVYI *et al.*, 2016).

- *Previsibilidade*

Previsibilidade é a capacidade de prever o comportamento do CPS, suportando a detecção de eventos inesperados e a análise da causa raiz em caso de falha (HEISS *et al.*, 2015).

Segundo Gunes *et al.* (2015), a previsibilidade refere-se ao grau de previsão do estado de um sistema de forma qualitativa ou quantitativa. Um sistema altamente previsível deve garantir o resultado especificado da funcionalidade do sistema, a cada momento em que está operando, atendendo a todos os requisitos do sistema.

A previsibilidade é uma característica essencial do gerenciamento de operações, pois melhora a capacidade da fábrica inteligente baseada em CPS de reagir rapidamente às mudanças. De fato, a previsibilidade fortalece a adaptabilidade da produção e da logística (FACCHINETTI; DELLA VEDOVA, 2011) e a implementação de manutenção preditiva, por exemplo (WANG, 2016).

A previsibilidade é possibilitada pela capacidade de diagnóstico das fábricas inteligentes baseadas em CPS: essas fábricas devem detectar e diagnosticar autonomamente a causa raiz dos defeitos do produto ou apoiar ativamente os usuários na identificação deles; além disso, eles devem operar de maneira rastreável (RIBEIRO; HOCHWALLNER, 2018; RIBEIRO; BJORKMAN, 2018).

De fato, na fabricação inteligente, o diagnóstico e a previsão de falhas nos equipamentos se tornarão rotineiros e, em alguns casos, o reparo autônomo poderá ocorrer (KUSIAK, 2017). Por exemplo, máquinas inteligentes podem acionar processos de manutenção automaticamente e podem prever falhas (HWANG, 2016).

### 2.2.5 APLICAÇÃO DE CPPS EM OPERAÇÕES E PROCESSOS DE USINAGEM

Nesta seção será apresentado o desenvolvimento de propostas/aplicações a operarem em ambientes CPPS na manufatura, com foco em processos de manufatura de usinagem.

- **Placa Mandril inteligente**

Reinhart *et al.* (2013) e CyPros (2013) apresentam o desenvolvimento de uma placa mandril inteligente que incorpora habilidades de tomada de decisão localizadas na rede e não no próprio mandril (Figura 11). A integração vertical se estende até o nível de gerenciamento da empresa, uma vez que o impacto está situado no campo do planejamento e controle da produção.

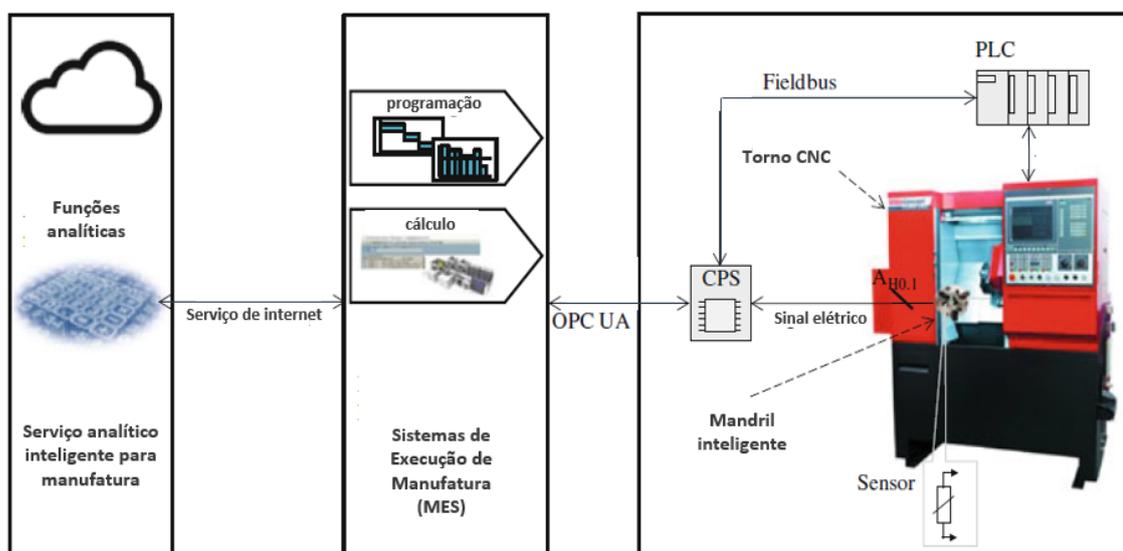


FIGURA 11 – PLACA MANDRIL INTELIGENTE (ADAPTADO DE CYPROS, 2013)

Esta placa mandril inteligente controla e regula sua força de fixação com base nos dados do sensor, sendo medidos diretamente na peça fixada. Na hierarquia de automação horizontal, a placa mandril consegue se comunicar com o PLC. Nesta base, pode ser implementada uma comparação exigência-capacidade entre o produto e a placa mandril. Como resultado, os tempos de configuração podem ser reduzidos (REINHART *et al.*, 2013).

Além disso, este processo de torneamento autorregulado permite maior qualidade do produto e um mínimo de intervenção no processo. Na hierarquia vertical, o mandril inteligente é totalmente integrado ao *SAP ME (Manufacturing Execution)* pelo uso do *OPC UA*<sup>5</sup> (incorporação de vinculação de objetos para arquitetura unificada de controle de processos) e *Ethernet*. Assim, o *SAP ME* representa a plataforma de informações centralizada que permite decisões de controle situacional. Um sequenciador orientado a serviços se comunica com o *SAP ME* por meio de um serviço da web e calcula a sequência de ordens ideal, dependendo das partes da fila e dos objetivos logísticos priorizados específicos da empresa, e tempos de produção (BERGER *et al.*, 2016)

- ***Ferramenta de Usinagem Inteligente***

Outra aplicação do *CPPS* na manufatura é o desenvolvimento de ferramenta de usinagem inteligente, conforme apresentado na Figura 12.

---

<sup>5</sup> ***OPC UA***: O *OPC Unified Architecture* é um conjunto de padrões aberto e isento de royalties concebido como um protocolo universal de comunicação de chão de fábrica desenvolvido pela *OPC Foundation* (MAHNKE; LEITNER; DAMM, 2009).

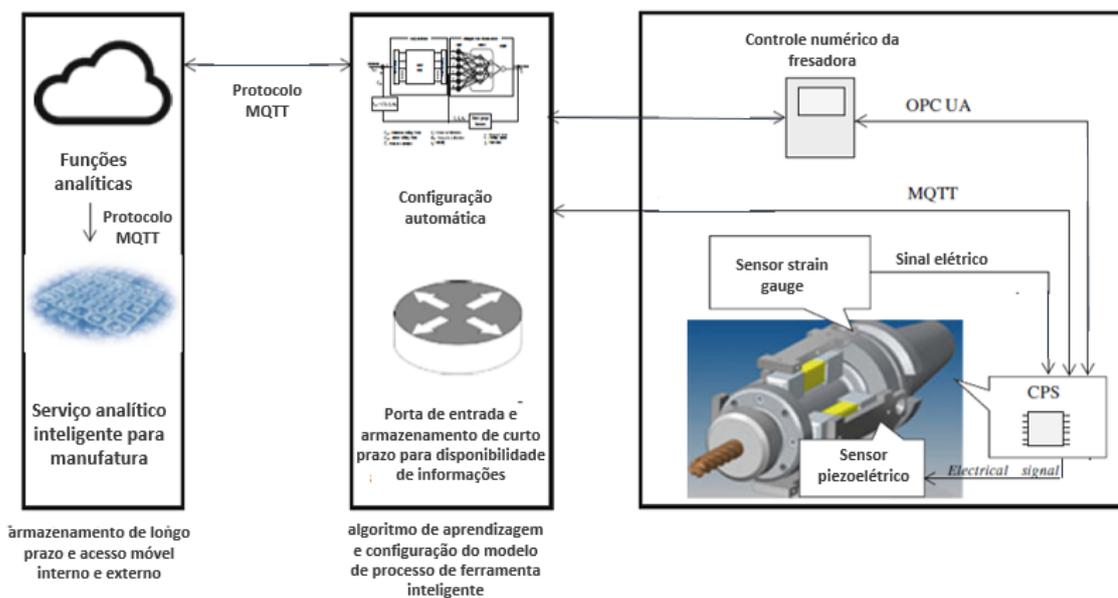


FIGURA 12 – FERRAMENTA DE USINAGEM INTELIGENTE (ADAPTADO DE BERGER ET AL., 2016)

Nesta aplicação, a ferramenta inteligente inclui dois conceitos que são classificados separadamente. Primeiro o controle de avanço adaptativo que tem impacto no nível de gerenciamento da empresa, pois é usado para análise de acordo com o desgaste e a quebra da ferramenta. Segundo a inteligência, que está situada na rede, pois os parâmetros aplicáveis podem ser controlados apenas pelo controle numérico. A notificação ativa de problemas é o nível apropriado de inteligência, uma vez que o operador precisa implementar um modelo de processo estático para construir a configuração da ferramenta. O sistema de compensação da vibração se comunica apenas no nível do chão de fábrica, uma vez que requisitos em tempo real surgem nesse sistema (BERGER *et al.*, 2016).

### 2.3 AMBIENTE DE MANUFATURA 4.0 NOS PROCESSOS DE USINAGEM

A premissa da Indústria 4.0 para os ambientes de manufatura, é que máquinas do chão de fábrica estejam conectadas e sejam capazes de se comunicarem entre si (KOENIG, 2017a). Esta conexão entre o equipamento e a linha de

produção, visa realizar a troca de informações e atingir um conceito de manufatura inteligente (CHEN *et al*, 2017).

Para aumentar a flexibilidade de produção e reduzir significativamente os custos de produção e o tempo ocioso das máquinas, as empresas, segundo Liu *et al.* (2020) devem investir nas máquinas e fábricas inteligentes para implementar o modelo de produção 4.0.

Nos ambientes de manufatura, o núcleo da Indústria 4.0 está baseado nas aplicações de *IoT*, configuração de equipamento inteligente, análise de *big data* e melhoria dos processos de produção da fábrica (LIU, LI, 2019).

Muitos países avançam na meta da Indústria 4.0 devido ao rápido desenvolvimento da manufatura industrial nos últimos anos. No que diz respeito às empresas de manufatura, estas aumentam o número de máquinas-ferramenta CNC para melhorar a capacidade de produção e permanecer em um ambiente competitivo (CHEN *et al*, 2017).

No processo de usinagem, existe uma tendência para o uso de *CPPS* para aumentar a eficiência da produção com máquinas CNC (GALAMBOS *et al.*, 2015).

Do ponto de vista organizacional, uma máquina ou qualquer outro equipamento usado em um sistema de fabricação pode ser considerado um elemento parcialmente isolado no chão de fábrica. Por outro lado, considerando os conceitos sobre o *CPPS*, esses elementos mencionados são a parte física e a instalação de novos aparelhos para monitorar um processo de usinagem pode ser cuidadosamente planejada, a fim de integrar essas tecnologias heterogêneas (LINS *et al.*, 2020).

Levando em consideração o contexto dos sistemas de fabricação, o principal desafio é integrar todos os dispositivos, equipamentos e componentes adequadamente, a fim de garantir que o sistema faça medições no prazo, decida o momento correto em que uma ferramenta deve ser substituída e

conseqüentemente, acionar os atuadores e dispositivos corretamente (DENG *et al.*, 2017).

A seguir serão apresentados os principais sistemas envolvidos em um ambiente de manufatura 4.0 e suas características operacionais e de integração.

### **2.3.1 MÁQUINA-FERRAMENTA 4.0 (MF 4.0)**

O uso generalizado e as melhorias tecnológicas contínuas das máquinas operatrizes tiveram um impacto significativo na produtividade da indústria manufatureira desde o início da revolução Industrial. No alvorecer da nova era da industrialização, a necessidade de avançar as máquinas-ferramenta para um novo nível que esteja de acordo com o conceito da Indústria 4.0 deve ser reconhecida e abordada (XU, 2017).

O conceito de máquina-ferramenta inteligente tem como princípios a capacidade de monitorar e controlar todas as tecnologias individuais e sistemas de controle para oferecer um ótimo desempenho geral (MEKID; PRUSCHEK; HERNANDEZ, 2009; ATLURU; HUANG; SNYDER, 2012; CAO; ZANG; CHEN, 2017).

De fato, muito parecido com as quatro fases da industrialização, as máquinas-ferramenta também passaram por três estágios de avanços tecnológicos (LIU; XU, 2017).

No primeiro estágio (1775-1945) as máquina-ferramenta eram amplamente acionadas mecanicamente, mas operada manualmente. No segundo estágio (1945-1980), as máquinas-ferramenta eram acionadas eletronicamente e controlada numericamente. E no terceiro estágio de avanços tecnológicos (1980 em diante), as máquina-ferramenta começaram serem controladas via controle numérico computadorizado, permitindo assim a automação da produção (XU, 2017).

Na medida que se avança na era da Indústria 4.0, também se inicia o desenvolvimento da máquina-ferramenta 4.0 (*Machine Tools 4.0*). A Figura 13



profundamente a máquina-ferramenta, processos de usinagem, computação e rede (LIU; XU, 2017).

Segundo Liu e Xu (2017) a *CPMT* consiste da integração da máquina-ferramenta, processos de usinagem, computação e rede, na qual os cálculos embutidos monitoram e controlam os processos de usinagem, com ciclos de realimentação nos quais os processos de usinagem podem afetar os cálculos e vice-versa.

Essa nova geração de máquinas-ferramenta exige um esforço coletivo dos fabricantes, usuários e pesquisadores de máquinas-ferramenta para definir um roteiro para o desenvolvimento de tecnologia e uma estratégia para a implementação industrial (CAO; ZANG; CHEN, 2017).

A *CPMT* possui recursos de se comunicar semanticamente com outros sistemas de produção (robôs, transportadores, *AGV*) em um cenário de fabricação reconfigurável (XU, 2017).

Segundo Liu e Xu (2017) e Deng *et al.* (2018a) a *CPMT* é uma aplicação do *CPS* no ambiente de produção, na qual compartilha os recursos comuns do *CPS* típico, incluindo conectividade de rede, adaptabilidade, previsibilidade, inteligência, com realimentação em tempo real e com humanos no ambiente. Mais especificamente, dados em tempo real gerados por máquinas-ferramenta e processos de usinagem são capturados usando vários sensores e dispositivos de aquisição de dados.

A Figura 14 apresenta a estrutura de uma *MF 4.0* em um ambiente *CPPS*.

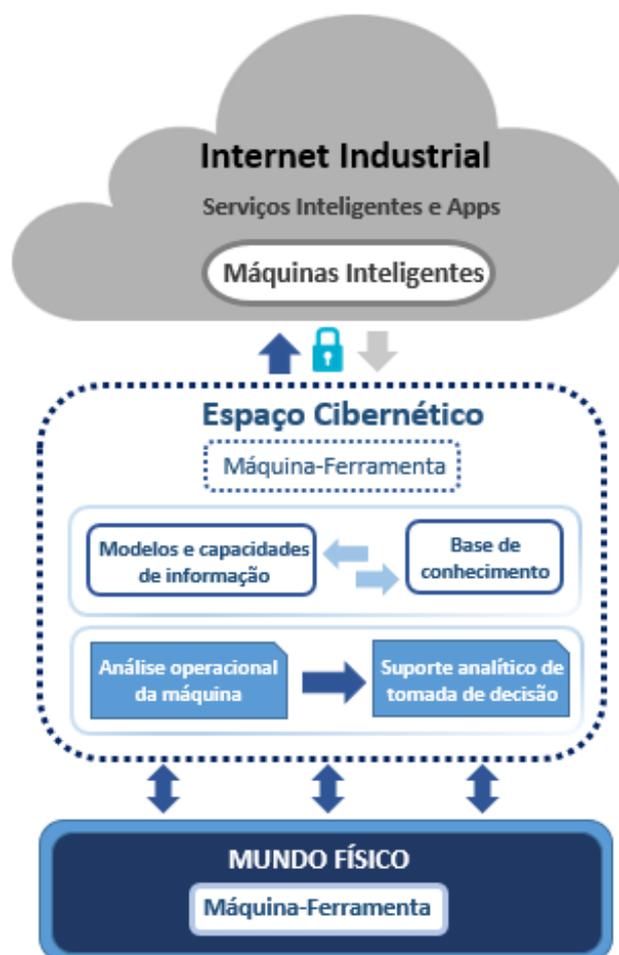


FIGURA 14 – MF 4.0 EM AMBIENTE CPPS (ADAPTADO DE XU, 2017)

Como pode ser observado, no nível físico encontra-se a máquina-ferramenta, incluindo todos os componentes e subsistemas, que geram dados em tempo real por meio do uso de sensores, dispositivos de aquisição de dados internos instalados na máquina, bem como dispositivos externos, que podem se comunicar via rede física ou internet (MOURTZIS, 2020).

O nível cibernético, funciona como o cérebro da máquina-ferramenta, aproveita ao máximo os dados em tempo real coletados no mundo físico e confere à máquina-ferramenta física funcionalidades inteligentes e autônomas (AL-MAEENI *et al.*, 2020).

E o último nível, relacionado a plataforma em nuvem, possibilita uma Interface Homem-Máquina (IHM) Inteligente, visto que com extensos dados em tempo

real e cálculos profundamente integrados aos processos de usinagem, este nível permite aos usuários interagir intuitivamente com o sistema e tomar decisões eficientes, fornecendo acesso aos dados e diagnósticos. Deste modo, *tablets*, *Smartphones* e dispositivos portáteis são capazes de se tornarem IHM inteligentes com as implementações de várias tecnologias de interação e rede (JEON *et al.*, 2020).

A *MF 4.0* apresenta uma extensa implementação de tecnologias *CPS*, Internet das Coisas e Computação em Nuvem em máquinas-ferramenta CNC (LIU *et al.*, 2020).

### **2.3.2 INTERNET DAS COISAS**

O conceito de manufatura inteligente, segundo Pisching *et al.* (2015), baseia-se na integração dos conceitos de Internet das Coisas (*Internet of Things - IoT*) e *CPS*.

Tedeschi *et al.* (2018) apresentam que a *IoT* pode ser entendida como uma tecnologia capacitadora à I 4.0 e fabricação inteligente semelhantes ao *CPS*.

Segundo Liu *et al.* (2017) apresentam que a *IoT* é caracterizada pelo uso da Internet e outros meios de comunicação, sistemas computacionais, sensores, controladores e objetos (ou ambiente) que são conectados para formar uma rede, de coleta e troca de dados, que conectam humanos, objetos e sistemas, para a informatização, gerenciamento remoto e controle inteligente.

Quando o termo *IoT* surgiu pela primeira vez, ele foi referido a objetos conectados interoperáveis e identificáveis de forma única, usando a tecnologia de identificação por radiofrequência (*Radio Frequency Identification - RFID*). Posteriormente, a tecnologia *IoT* foi usada com outras tecnologias, como sensores, atuadores, Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System - GPS*) e dispositivos móveis operados via *Wi-Fi*, *Bluetooth*, redes celulares ou comunicação por campo de proximidade (*Near Field Communication - NFC*) (XU; XU; LI, 2018).

Liu *et al.* (2017) e Tedeschi *et al.* (2018) apresentam que a *IoT* é uma tecnologia importante e inovadora usada para definir protocolos de Internet para permitir a comunicação entre máquinas, dispositivos, objetos e sensores, obtendo percepção geral, transmissão confiável e processamento inteligente de informações, possibilitando assim integrar a um ambiente 4.0.

A *IoT* exige que suas entidades físicas tenham uma certa quantidade de conceitos inteligentes incorporados, no sentido de comunicação, processamento de dados e / ou capacidade de detecção (THOBEN; WIESNER; WUEST, 2017).

A *IoT* é um importante facilitador do *CPS*, pois a comunicação entre os *CPS* pode depender da internet, e nesse caso, quando envolvem a internet, os *CPS* são sistemas *IoT* (WANG; TORNGREN; ONORI, 2015; ISAKSSON; HARJUNSKI; SAND, 2017; TEDESCHI *et al.*, 2018). Nessa sinergia entre sistemas (Figura 15), o *CPS* enfatiza o processo de feedback e controle, e a *IoT* enfatiza a percepção da informação e a transmissão dos dados (LIU *et al.*, 2017).

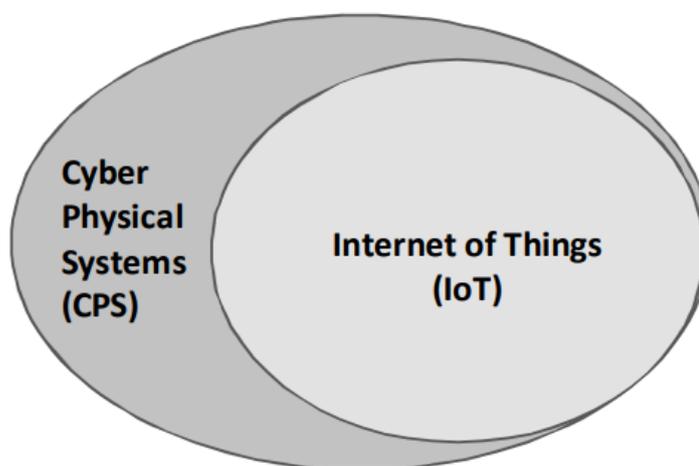


FIGURA 15 – RELAÇÃO ENTRE CPS E IoT (ADAPTADO DE CAMARINHA-MATOS ET AL., 2013)

Contando com a infraestrutura fornecida pela *IoT*, o *CPS* pode compartilhar e analisar dados e, com base no que aprende, pode enviar comandos de controle para recursos físicos: ao fazer isso, monitora e controla os processos físicos (ZHONG; WANG; XU, 2017).

### 2.3.3 COMPUTAÇÃO EM NUVEM

Além da conexão pela Internet, o processamento de informações, por meio da Computação em Nuvem (*Cloud Computing*), é outro elemento essencial desse novo conceito de ambiente conectado (OCHA; FORTINO; DI FATTA, 2017). A tecnologia em nuvem está cada vez mais sendo aplicadas em sistemas industriais (GAMBOA QUINTANILLA *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2017).

Em um contexto de manufatura, a computação em nuvem é vista como uma maneira de armazenar dados em um servidor na Internet, mas também para oferecer capacidade de produção em um mercado na forma de Manufatura como Serviço (PETRASCH; HENTSCHKE, 2016).

Fernando *et al.* (2013) descrevem a computação em nuvem como a junção da computação como utilitário e software como serviço, na qual os aplicativos são entregues como serviços pela Internet e o hardware e software de sistemas em *data centers* fornecem esses serviços.

Lu e Xu (2014) acrescentam que a computação em nuvem consiste de um modelo que fornece acesso à rede e capacidade sob demanda para um conjunto comum de recursos de computação que inclui *software* e *hardware*.

A computação em nuvem permite o acesso à rede que é conveniente e universal para um grupo compartilhado de recursos de computação, como redes, servidores, armazenamento, serviços e aplicativos que são configuráveis e podem ser provisionados para serem liberados rapidamente com pouco esforço do gerenciamento ou interações do provedor de serviços (MELL; GRANCE, 2011).

Com o uso da tecnologia de computação em nuvem, os sistemas empresariais se transformam, proporcionando às empresas mais agilidade na contratação dos serviços, ampliando a flexibilidade e melhorando a produtividade (KUNIO, 2010). Lu, Xu e Xu (2014) apresentam ainda que a computação em nuvem ajuda a transformar o modelo de negócios de manufatura tradicional, incentiva a

colaboração efetiva e permite que o processo de gerenciamento de um ciclo de vida completo do produto seja fornecido e o alinhamento da inovação do produto com estratégia de negócio

A tecnologia em nuvem permite serviço sob demanda e acesso a recursos, o que revolucionou o mercado de serviços de computação. A flexibilidade e os recursos sem fronteiras fornecidos pela tecnologia em nuvem motivaram os fabricantes a aproveitar as vantagens do serviço de aplicativos em nuvem em um esforço para melhorar e inovar seus processos de fabricação. O serviço de aplicativo em nuvem forneceu aos fabricantes um aplicativo de software baseado em nuvem, painel de gerenciamento baseado em web e colaboração baseada em nuvem, que trazem o processo de fabricação, gerenciamento e monitoramento para a nuvem, daí o nascimento da fabricação em nuvem (OOI *et al.*, 2017).

Com o suporte da computação em nuvem e *IoT*, surge o conceito de manufatura em nuvem (*Cloud Manufacturing - CM*), definido como a versão da manufatura da computação em nuvem (XU, 2012; PUTNIK, 2012; HAO; HELO, 2017). O *CM* é definido como um modelo de rede inteligente para manufatura que adota a computação em nuvem, que visa atender às demandas crescentes por maior individualização de produtos, cooperação global mais ampla, inovação intensiva em conhecimento e agilidade crescente de resposta ao mercado (XU, 2012).

Seu objetivo é realizado por meio do estabelecimento de uma plataforma de manufatura em nuvem comum, que integra recursos de manufatura distribuídos, transformando-os em serviços de manufatura e os gerencia de forma centralizada (XU, 2012; ADAMSON *et al.*, 2017).

O *CM* permite que vários usuários solicitem serviços ao mesmo tempo, enviando suas tarefas necessárias por meio de uma plataforma de manufatura em nuvem. Por meio de um gerenciamento centralizado e operação de serviços de manufatura, a manufatura em nuvem é capaz de lidar com várias tarefas de manufatura em paralelo. Ao lidar com um grande número de recursos de

manufatura distribuídos e ociosos a fim de atender aos vários requisitos de manufatura, a *CM* é capaz de fornecer um meio sustentável para alcançar uma produção mais limpa (ZHANG *et al.*, 2017a).

#### 2.3.4 COMUNICAÇÃO E PROTOCOLOS

A seguir serão apresentados os tipos comunicação e protocolos envolvidos em um ambiente de manufatura 4.0.

- ***MTConnect***

O *MTConnect* é um protocolo de comunicação leve, aberto e extensível, projetado para a troca de dados entre equipamentos de chão de fábrica e aplicativos de software (VIJAYARAGHAVAN *et al.*, 2008). Tornando assim uma opção viável para a integração de sistemas e máquinas-ferramenta (DENG *et al.*, 2018b).

Com o *MTConnect* é possível compartilhar dados entre máquinas-ferramenta e permitir interoperabilidade, permitindo acesso aos dados usando interfaces padronizadas (VIJAYARAGHAVAN *et al.*, 2008).

O *MTConnect* é desenvolvido sobre os principais padrões na Indústria de *software* e manufatura, incluindo *Extensible Markup Language (XML)* e *Hypertext Transport Protocol (HTTP)*, que maximiza o número de ferramentas disponíveis para sua implementação. Portanto, o *MTConnect* pode compartilhar dados perfeitamente em um formato comum entre diferentes elementos integrados em um sistema de manufatura (DENG *et al.*, 2018b).

O *MTConnect* fornece uma estratégia de baixo para cima que facilita a implementação. No entanto, atualmente é um padrão somente de leitura de dados, o que significa que ele só pode ser usado na leitura de dados dos dispositivos, e não na gravação deles (LIU; XU, 2017).

- ***OPC UA***

O *OPC Unified Architecture (OPC UA)* é um padrão de troca de dados para comunicação segura, confiável, independente de fabricante e plataforma. Ele permite a troca de dados entre sistemas operacionais e entre produtos de diferentes fabricantes (IEC, 2015).

Diferentemente do *MTCconnect*, o *OPC UA* é um padrão bidirecional que pode ser usado tanto para monitoramento quanto para controle (LIU, 2013).

O *OPC UA* atende a todos os requisitos de comunicação da Indústria 4.0 e também está cada vez mais se estabelecendo no ambiente de manufatura, pois permite comunicação vertical e horizontal e traz interoperabilidade semântica para o mundo inteligente dos sistemas em rede (OPC, 2016; PETHIG *et al.*, 2017).

O *OPC UA* já é oferecido em máquinas-ferramenta CNC; atualmente existem soluções da Siemens (*Access MyMachine / OPC UA*) e Fanuc (*Fanuc OPC Server*) disponíveis. No entanto, essas soluções não possuem a gama completa de funções necessárias para a troca automática de informações de dados. Portanto, ainda é necessário usar algumas interfaces específicas do fornecedor do comando numérico para preencher a lacuna. No que diz respeito às informações referentes às ferramentas de corte para usinagem, a interface fornecida pela Siemens é chamada *TDI (Tool Data Information)* e permite a codificação/decodificação de dados em *tags RFID* e armazená-los na lista de ferramentas. Além disso, em conjunto com o software *Create MyInterface*, da mesma empresa, ele pode solicitar os dados da ferramenta do sistema de gerenciamento com base em um *ID* específico escrito na *tag* (FALLAH; TRAUTNER, 2019).

- ***Machine to Machine (M2M)***

A comunicação *Machine to Machine (M2M)*, refere-se à comunicação direta entre dispositivos usando qualquer canal, com ou sem fio. A comunicação máquina a máquina pode incluir instrumentação industrial, permitindo que um sensor ou

medidor comunique os dados que registra ao software aplicativo que pode usá-lo (BIRAL *et al.* 2015).

A lógica por trás das comunicações *M2M* é baseada em duas premissas: a primeira, uma máquina em rede é mais valiosa do que uma isolada; e a segunda, quando várias máquinas são efetivamente interconectadas, mais aplicações autônomas e inteligentes podem ser geradas (WAN *et al.*, 2013).

Segundo Liu *et al.* (2017a), além da *M2M* representar a comunicação entre máquinas, em um sentido amplo, também pode indicar a comunicação entre pessoas e máquinas.

Nos ambientes da Indústria 4.0, a tecnologia *M2M* está pronta para remodelar vários aspectos da fabricação, especialmente em eficiência operacional, controle de qualidade, tomada de decisão, relacionamento com clientes e oportunidades transacionais (OZTEMEL; GURSEV, 2018).

Segundo XU (2017) uma *CPMT* possui o recurso *M2M*, pois pode se comunicar semanticamente com outros sistemas de produção (por exemplo, robôs, transportadores e *AGVs*) em um cenário de fabricação reconfigurável.

#### **2.4 SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS INTERNOS A LASER**

Como apresentado no item 2.3.1 (contextualização da *MF 4.0*), um dos níveis da estrutura que compõe a *MF 4.0* é o **nível físico**. Nesse, estão incluídos todos os componentes e subsistemas, que geram dados em tempo real. Alguns dos dados têm influência significativa na qualidade do produto, produtividade e eficiência de custos. A coleta desses dados é o pré-requisito para todas as funcionalidades subsequentes da *MF 4.0* integrada ao ambiente *CPPS* (MOURTZIS, 2020).

Nesse nível físico encontram-se inúmeros dispositivos periféricos utilizados para enviar e/ou receber informações para a máquina-ferramenta. Estes dispositivos

são sensores (dinamômetros, acelerômetros, emissão acústica, potência, efeito hall, temperatura, etc.), câmeras, etiquetas e leitores *RFID*, **sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos**, dispositivos de processamento de sinais e assim por diante. Estes dispositivos de aquisição de dados são responsáveis por coletar dados de fabricação em campo em tempo real dos componentes críticos e processos de usinagem, de modo que os dados importantes de fabricação em tempo real gerados durante os processos de usinagem possam ser registrados e analisados (TETI; JEMIELNIAK; O`DONNELL, 2010; AL-MAEENI *et al.*, 2020; JEON *et al.*, 2020).

No que diz respeito ao dispositivo periférico de pré-ajustagem de ferramentas interno, também conhecidos por *toolsetter*, este possui recursos que possibilitam durante o processo de usinagem: identificação da ferramenta; detecção de quebra da ferramenta; pré-ajustagem das ferramentas; redução de erros no *setup* relacionados ao posicionamento da ferramenta e/ou peça; medição dinâmica da ferramenta; compensação do desgaste da ferramenta; e compensação da dilatação térmica da máquina e da ferramenta (SORTINO; BELFIO; MOTYL, 2014; KOENIG, 2017b). Todos estes recursos, geram aumento na precisão da medição das ferramentas utilizadas no processo, redução do tempo de preparação da máquina, melhora a eficiência na usinagem e aumenta o tempo de disponibilidade da máquina-ferramenta CNC (VIEIRA JUNIOR *et al.*, 2016; EVANGELISTA *et al.*, 2019; CHENG *et al.*, 2019).

Estes equipamentos (Figura 16), são instalados sobre a mesa de trabalho ou em partes internas da máquina-ferramenta e toda a operação de medição da ferramenta é realizada de forma automática, apenas com a necessidade que o operador realize a fixação da ferramenta na máquina e informe as medidas aproximadas das ferramentas (CORRER *et al.*, 2011; COSTA; VIEIRA JUNIOR; CORRER, 2015).



*FIGURA 16 - SISTEMA AUTOMÁTICO DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS INTERNO SEM CONTATO A LASER (ADAPTADO DE GEOTECNO, 2020)*

Embora a precisão dos sistemas de pré-ajustagem de ferramentas, tenha atingido um nível muito alto, estes sistemas ainda não podem realizar a automação da produção do produto, devido à falta de integração com outros sistemas. Como exemplo, os sistemas atuais apenas se comunicam com o CNC da máquina-ferramenta (YU *et al.*, 2017).

#### **2.4.1 OPORTUNIDADES DE IMPLEMENTAÇÃO DE FUNCIONALIDADES AOS SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS INTERNOS**

A seguir são apresentadas possibilidades da implementação de funcionalidades aos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos a laser afim de habilitá-los a operar em ambiente *CPPS* da Indústria 4.0:

- ***Diagnóstico remoto***

No contexto de fabricação inteligente, o diagnóstico e a previsão de falhas nos equipamentos estão se tornando rotineiros e, em alguns casos, o reparo autônomo poderá ocorrer (KUSIAK, 2017; PANETTO *et al.*, 2019). Nesse caso, a manutenção pode ocorrer antes que ocorram falhas, pois os dados são

trocados repetidamente; sendo assim, o tempo de inatividade do processo é minimizado (GORECKY; LOSKYLL, 2014; KOENIG, 2017b). Por exemplo, máquinas inteligentes podem acionar processos de manutenção automaticamente e podem prever falhas (HWANG, 2016; TRAN *et al.*, 2019).

Com base nestas informações, ao implementar a funcionalidade de diagnóstico remoto aos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos, seria possível atuar no monitoramento da condição operacional do sistema (manutenção preditiva *online*), podendo disponibilizar tanto para a empresa fabricante do sistema, como para o cliente a condição operacional em tempo real do sistema, possibilitando assim, a tomada de decisão tanto pelo cliente como pelo fabricante do sistema do momento na manutenção.

A título de exemplo, poderia ser monitorado, nos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser, o nível de impurezas no dispositivo óptico do sistema (lente do modulo laser e sensor de interrupção), fator este que interfere, diretamente, no desempenho do sistema e qualidade da medição.

- ***Interface Homem-Máquina Inteligente***

Segundo Monostori (2014) e Ribeiro (2017) novos modos de comunicação homem-máquina devem ser realizados durante o estabelecimento do ambiente *CPPS*.

No paradigma da criação do ambiente *CPPS*, as tarefas humanas serão diferentes. Os trabalhadores enfrentarão interfaces computadorizadas abundantes, tomarão decisões mais complexas e coordenarão a produção autônoma. Coletivamente, as tarefas de trabalho humano, as áreas de trabalho e as formas de interação com as máquinas serão diferentes. O objetivo do surgimento do ambiente *CPPS* não é remover humanos, mas envolver completamente os humanos usando sua inteligência (LIU *et al.*, 2017d; WU; GOEPP; SIADAT, 2019).

Com base nestas informações, ao habilitar os sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos a operar em ambiente *CPPS*, tanto os dados coletados pelo sistema, como os dados de outros dispositivos periféricos e da *MF 4.0* poderão estar sendo armazenados e processados via plataforma de computação em nuvem. Sendo assim, novas informações serão geradas e poderão ser acessadas de forma remota por meio da configuração e desenvolvimento de aplicativos móveis, para auxiliar tanto o operador como o gestor para tomada de decisão mais assertivas do processo.

- ***Novos Serviços para Manufatura***

Com a utilização da computação em nuvem, ocorre uma mudança no modelo de negócios da manufatura tradicional. Apresenta-se um novo campo de atuação para as empresas fabricantes máquinas de equipamentos relacionadas a prestação de serviços com valor agregado (SHAO, 2021). Por exemplo, os fabricantes de máquinas-ferramenta CNC podem fornecer serviços de otimização de usinagem para seus usuários, e os fabricantes de ferramentas de corte podem oferecer serviços de previsão de desgaste de ferramentas para seus usuários de ferramentas de corte (OOI *et al.*, 2017). Assim sendo, os usuários podem solicitar serviços específicos com base em requisitos e pagar com base no uso (LIU; XU, 2017).

A partir das informações apresentadas, os fabricantes de sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos, podem oferecer uma prestação de serviços com valor agregado, a partir das funcionalidades de diagnóstico remoto, interface homem-máquina e integração com outros dispositivos periféricos.

Exemplos de serviços oferecidos pelas empresas fabricantes de sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos seriam:

- *Monitoramento do equipamento*: a empresa fabricante, pode oferecer um plano de monitoramento do equipamento, visando sempre a garantia da operacionalidade do sistema. Este serviço poderia, por exemplo: Monitorar se o equipamento está sendo utilizado, integralmente, nas

funcionalidades solicitadas pelo cliente; Monitorar preditivamente a condição operacional do sistema em tempo real gerando avisos aos responsáveis para realização da manutenção; Iniciar um processo de manutenção corretiva, imediatamente, ao detectar alguma ocorrência que demandaria a presença do técnico do fabricante no local.

- *Monitoramento de ferramental de corte:* a empresa fabricante, pode oferecer um plano de monitoramento de ferramental de corte. Este serviço poderia analisar, por exemplo, o consumo de ferramental e fornecer diagnósticos sobre o rendimento do ferramental utilizado, bem como outros serviços que poderiam vir a serem necessários nesse tipo de aplicação.
- *Aluguel de equipamentos:* a empresa fabricante pode oferecer o sistema produto-serviço, e efetuar a cobrança a partir das funcionalidades contratadas, como por exemplo, manutenção preventiva, monitoramento de ferramental de corte, bem como, a cobrança do serviço em função do número de medições realizadas pelo equipamento.

Nas empresas de manufatura, ainda existe um grande número de máquinas-ferramenta CNC que não estão habilitadas a operarem em ambiente *CPPS* da Indústria 4.0. Entretanto, a partir da implementação das funcionalidades nos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos, apresentadas anteriormente, estas também podem ser implementadas nestas máquinas e contribuir para o avanço destas empresas rumo a Indústria 4.0.

### 3 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo descreve a abordagem metodológica adotada nesta tese. Para isso, são apresentados e detalhados a classificação e os procedimentos de pesquisa utilizados para o desenvolvimento um módulo de comunicação para habilitar um sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser a operar em ambiente de produção físico cibernético da Indústria 4.0.

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A Figura 17 apresenta a classificação da pesquisa para o desenvolvimento da presente tese.

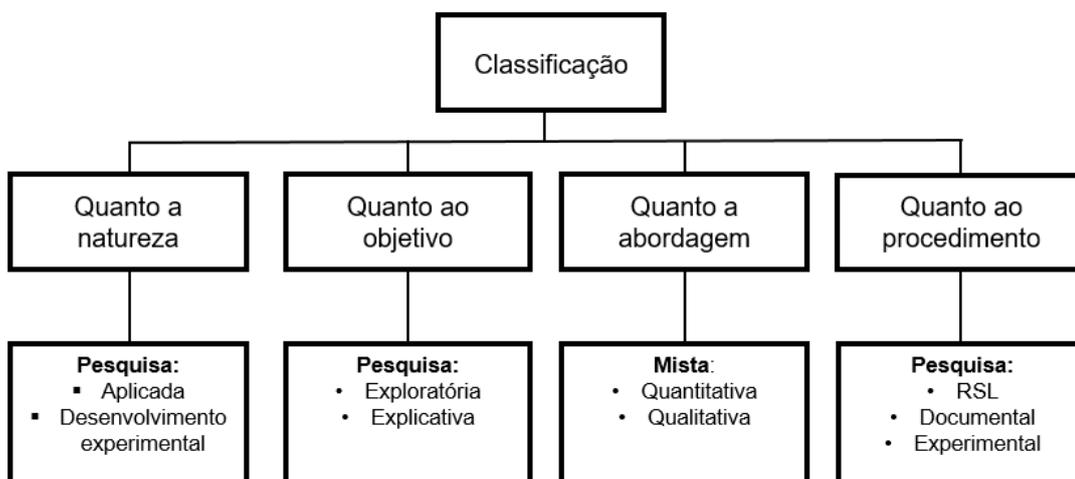


FIGURA 17 – CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Deste modo a classificação desta pesquisa se dá quanto a sua/seu:

- **Natureza:** *Aplicada*, pois tem como objetivo conseguir informações e/ou conhecimento acerca de determinado problema para o qual se procura uma resposta, uma hipótese que se queira comprovar, e descobrir novos fenômenos ou uma relação entre eles (MARCONI; LAKATOS, 2010); *Desenvolvimento Experimental*, pois tem o objetivo do desenvolvimento

de novas aplicações e melhorias de sistemas a partir dos conhecimentos advindos da pesquisa aplicada (OCDE, 2013).

- **Objetivo:** *Explicativa*, tem como foco conectar as ideias e fatores identificados na pesquisa para compreender as causas e efeitos de um determinado fenômeno (NAKANO, 2012); *Exploratória*, visa explorar uma área da qual pouco se conhece e ampliar as fronteiras do campo de conhecimento (KUMAR, 2011).
- **Abordagem:** *Quantitativa*, pois captura as evidências do trabalho por meio da análise das variáveis envolvidas, sem nenhum subjetivismo ou influências nos fatos a serem analisados (MIGUEL, 2007); *Qualitativa*, pois se destaca na perspectiva do indivíduo que está sendo estudado e no ambiente no qual ele se insere (BRYMAN, 1989).
- **Procedimentos:** *Revisão da Literatura Narrativa; Revisão Sistemática da Literatura* (LEVY; ELLIS, 2006); *Pesquisa Documental* (GIL, 2008); *Desenvolvimento experimental* (JUNG; CATEN; RIBEIRO, 2010; OCDE, 2013).

### 3.2 ABORDAGEM METODOLÓGICA

O objetivo desta seção é apresentar as etapas utilizadas na abordagem metodológica desta tese, como ilustrado na Figura 18.

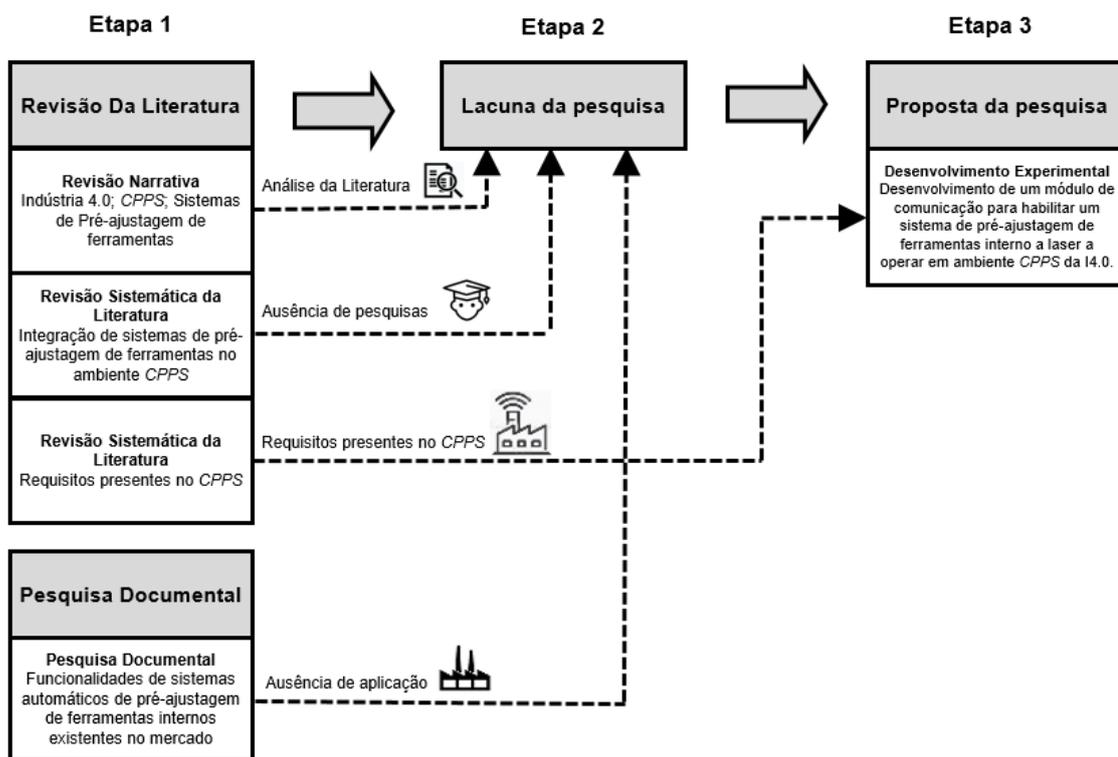


FIGURA 18 - ABORDAGEM METODOLÓGICA

### 3.2.1 ETAPA 1

A seguir é apresentado o desenvolvimento desta etapa, com base no desenvolvimento da revisão narrativa da literatura, das revisões sistemáticas da literatura e pesquisa documental.

- **Revisão Narrativa da Literatura**

A partir da revisão narrativa da literatura da seção 2.2, 2.3 e 2.4, foram selecionados os principais conceitos e teorias sobre CPPS, ambientes de manufatura 4.0 e sistemas de pré-ajustagem de ferramentas.

Nessa revisão foi possível identificar que o CPPS é definido como a aplicação do CPS no campo da manufatura e produção (RUDTSCH *et al.*, 2014; PEREZ *et al.*, 2015; THIEDE; JURASCHEK; HERRMANN, 2016; NAYAK *et al.*, 2016; LU; XU, 2019; NAPOLEONE; MACCHI; POZZETI, 2020), adotando-se então esta definição de CPPS para a presente pesquisa.

Para o ambiente de Manufatura 4.0, foi abordado a *MF 4.0* na qual apresentou-se sua definição a partir da integração com os sistemas *IoT*, computação em nuvem, e com os dispositivos periféricos encontrados em um ambiente de manufatura, sendo o sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno, um desses periféricos.

Para os sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos, destacou-se os recursos disponíveis nos sistemas atuais e as oportunidades de habilitar funcionalidades aos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos a operarem no ambiente *CPPS* da Indústria 4.0.

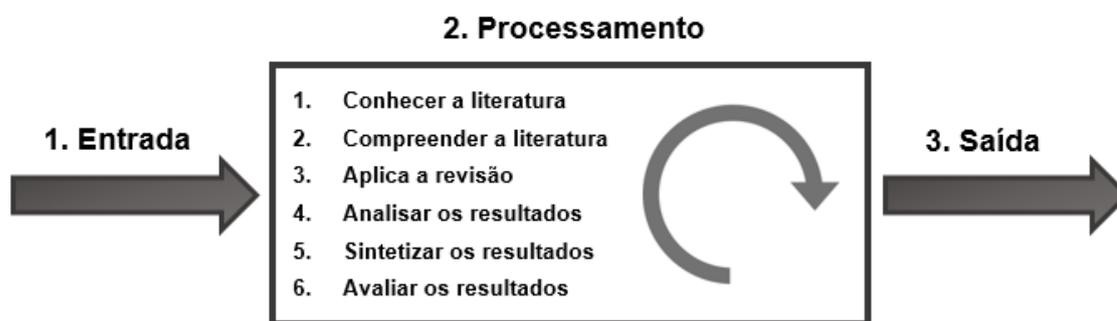
- ***Revisão Sistemática da Literatura***

Foram realizadas duas revisões sistemáticas da literatura. A primeira revisão sistemática da literatura com finalidade de identificar na literatura a existência de aplicação de sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos ao *CPPS* da Indústria 4.0.

Uma segunda revisão sistemática da literatura, foi orientada para identificar quais os requisitos presentes em um *CPPS*. Estes requisitos presentes, serão utilizados na terceira etapa, no momento da definição da proposta de pesquisa.

Uma RSL usa métodos de pesquisa rigorosos e explícitos para identificar, selecionar, avaliar a qualidade do material, coletar os materiais, bem como analisar e descrever as reais contribuições para o desenvolvimento da pesquisa (CORDEIRO *et al.*, 2007). O método de uma RSL é compreendido como o processo de coletar, conhecer, compreender, analisar, sintetizar e avaliar um conjunto de artigos científicos com o propósito de criar um embasamento teórico-científico (estado da arte) sobre um determinado tópico ou assunto pesquisado (LEVY e ELLIS, 2006).

Uma efetiva RSL, segundo Levy e Ellis (2006), se dá em três etapas, apresentadas na Figura 19.



*FIGURA 19 – ETAPAS DE UMA RSL (ADAPTADO DE LEVY E ELLIS, 2006)*

A etapa de entrada compreende em determinar os termos e busca, selecionar as fontes primárias de pesquisa, delimitar os critérios de inclusão e exclusão, executar a pesquisa e compilar os resultados.

A etapa de processamento apresenta a execução cíclica de 6 fases determinadas (conforme apresentado na Figura 19), aumentando o conhecimento sobre o assunto e repetindo-as quantas vezes forem necessárias até que os objetivos sejam atendidos. Dentro desta etapa apresentam-se as fases de conhecer a literatura, compreender a literatura, aplicar a revisão, analisar os resultados, sintetizar os resultados e avaliar os resultados.

A etapa da saída é representada pela divulgação dos resultados a partir das informações pesquisadas.

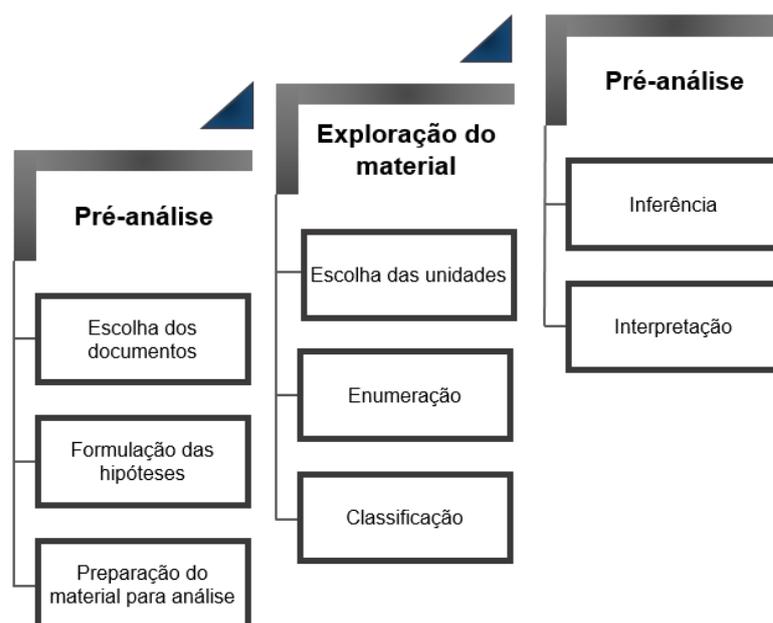
- ***Pesquisa Documental***

Também na etapa 1, foi desenvolvida uma pesquisa documental baseada na leitura de catálogos e manuais técnicos dos fabricantes de sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas interno, com o objetivo de identificar quais são os recursos e funcionalidades presentes nesses sistemas.

A pesquisa documental é um procedimento que utiliza métodos e técnicas para a apreensão, compreensão e análise de documentos dos mais variados tipos (FLICK, 2011). Este tipo de pesquisa se destaca pela busca de materiais que ainda não receberam um tratamento analítico, ou que ainda podem ser

retrabalhados de acordo com os objetos de pesquisa (GIL, 2008). Nesse sentido, o trabalho do pesquisador requer uma análise mais cuidadosa, uma vez que os documentos não sofreram nenhum tratamento científico anteriormente (MARCONI; LAKATOS, 2010).

Uma pesquisa documental, segundo GIL (2008), se dá em três estágios, apresentadas na Figura 20.



*FIGURA 20 – ESTRUTURA DA PESQUISA DOCUMENTAL (ADAPTADO DE GIL, 2008)*

O primeiro estágio caracteriza-se da pré-análise do material com a escolha dos documentos a serem analisados, formulação da hipótese e a preparação do material para análise.

O segundo estágio consiste em realizar a exploração e classificação do material será utilizado para a análise.

E por fim, o terceiro estágio representa o tratamento de dados. Como em boa parte dos casos os documentos a serem utilizados na pesquisa não receberam nenhum tratamento analítico, torna-se necessária uma análise criteriosa de seus dados, em observância aos objetivos e ao plano da pesquisa definido.

### 3.2.2 ETAPA 2

Na segunda etapa, é identificada a lacuna da literatura a partir da análise realizada na revisão sistemática da literatura sobre os sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos, e, na pesquisa documental referente a identificação dos recursos e funcionalidades dos sistemas de pré-ajustagem automáticos de ferramentas internos existentes e comercializados no mercado.

### 3.2.3 ETAPA 3

A partir dos resultados obtidos na etapa 1 e 2, estabelece-se a contribuição da presente pesquisa. Para isso, define-se o procedimento de pesquisa e desenvolvimento experimental de um módulo de comunicação para habilitar um sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser a operar em ambiente *CPPS* da Indústria 4.0.

Segundo Gil (2010), as pesquisas são classificadas segundo sua finalidade, estas podem ser básicas ou aplicadas. A pesquisa básica aglutina estudos que tem como objetivo completar uma lacuna no conhecimento, enquanto a aplicada abrange estudos elaborados com a finalidade de resolver problemas no âmbito das sociedades em que os pesquisadores vivem.

Entretanto, diante da considerável expansão das pesquisas, em especial para Pesquisa e Desenvolvimento de novos produtos (P&D), outras classificações foram acrescentadas, como o método para a Pesquisa e Desenvolvimento Experimental (Figura 21), proposto pela Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e documentado no *“Manual de Frascati”* (OCDE, 2013).

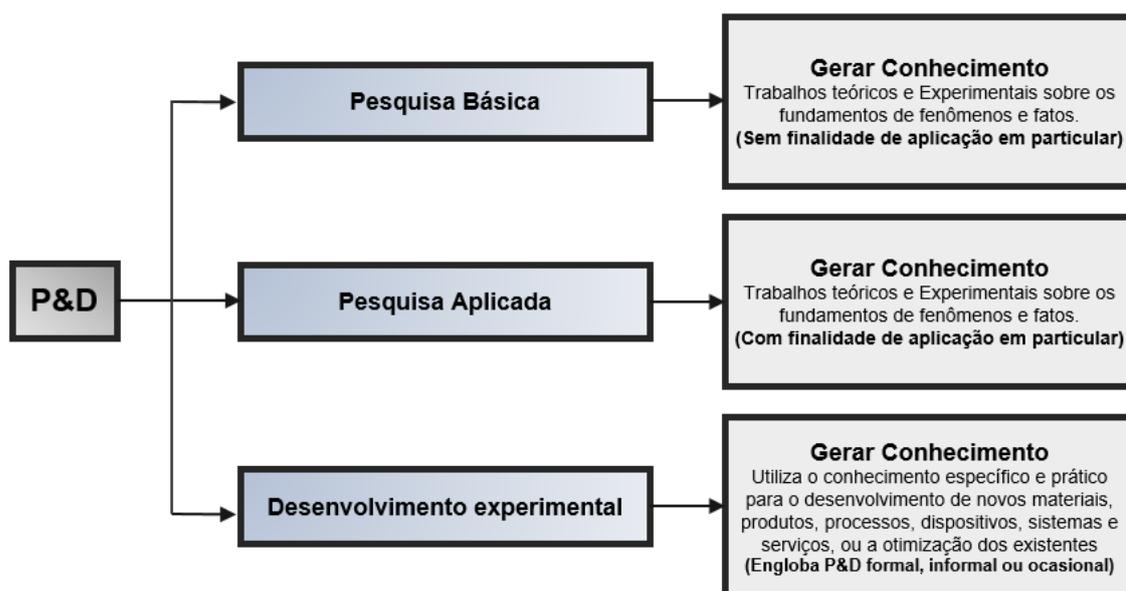


FIGURA 21 - CLASSIFICAÇÃO DE PESQUISA PARA P&D (ADAPTADO DE JUNG; CATEN; RIBEIRO, 2010)

Com apresentado na Figura 21, as principais características desta classificação são (OCDE, 2013):

- **Pesquisa básica**, consiste em trabalhos experimentais ou teóricos que se empreendem fundamentalmente para obter novos conhecimentos acerca dos fundamentos de fenômenos e fatos observáveis, sem levar em conta uma determinada aplicação ou utilização;
- **Pesquisa aplicada**, consiste também em trabalhos originais realizados para adquirir novos conhecimentos; no entanto, está dirigida fundamentalmente para um objetivo prático específico.
- **Desenvolvimento experimental**, consiste em trabalhos sistemáticos baseados nos conhecimentos existentes obtidos pela investigação e/ou pela experiência prática, e dirige-se à produção de novos materiais, produtos ou dispositivos, à instalação de novos processos, sistemas e serviços, ou à melhoria substancial dos já existentes.

Como pode ser observado, a pesquisa básica e a pesquisa aplicada são as fases iniciais para o processo de P&D de novos produtos. E o desenvolvimento experimental é uma das fases que tem como objetivo desenvolver novas aplicações, produtos e processos. Em outras palavras, o desenvolvimento experimental, cobre uma lacuna existente entre a pesquisa e a produção, visto que transforma e refina os conhecimentos advindos da pesquisa para aplicação prática (YANG *et al.*, 2014).

A pesquisa e desenvolvimento experimental, segundo Jung, Caten e Ribeiro (2010), se caracterizam em três estágios, apresentadas na Figura 22.

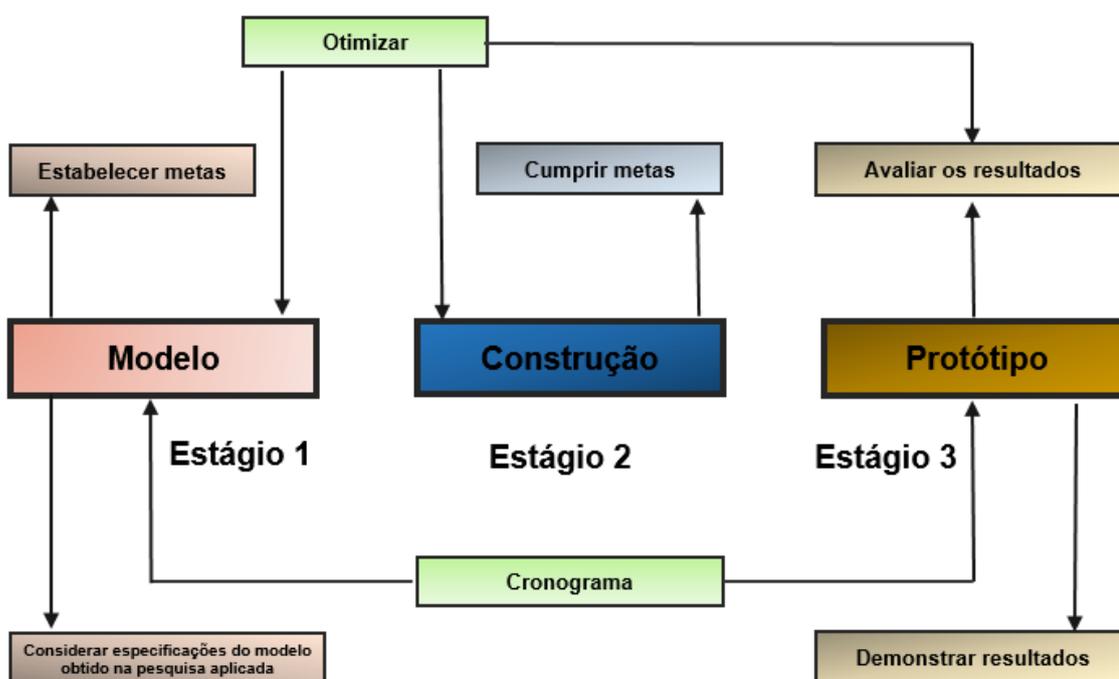


FIGURA 22 – ESTÁGIOS DO DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL (ADAPTADO DE JUNG, CATEN, RIBEIRO, 2010)

O estágio de modelo compreende considerar as especificações e requisitos obtidos na fase da pesquisa aplicada, e estabelecer as metas (funcionalidades) para o desenvolvimento da aplicação.

O estágio de construção é caracterizado pelo projeto do produto, processo ou aplicação, integrando as funcionalidades definidas na etapa de modelo do desenvolvimento experimental.

O estágio de protótipo, junto com o estágio de construção, compreende a fase mais importante do desenvolvimento experimental. Um protótipo é um modelo original (ou situação de ensaio) que inclui todas as características técnicas e desempenhos do novo produto ou processo. Nesta etapa são avaliados e demonstrados os resultados obtidos no desenvolvimento da aplicação.

No processo para demonstrar a aplicabilidade do protótipo, Yang *et al.* (2014) apresentam a possibilidade de envolver usuários em potencial para especificar os resultados a serem alcançados e determinar o nível de precisão no estudo.

## 4 ÉTAPAS DO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Este capítulo apresenta a realização das etapas da pesquisa, apresentadas na Figura 18 para o desenvolvimento de um módulo de comunicação para habilitar um sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser a operar em ambiente *CPPS* da Indústria 4.0.

### 4.1 DESENVOLVIMENTO ETAPA 1

Esta seção apresenta o desenvolvimento da RSL e pesquisa documental apresentado no item 3.2.1.

#### 4.1.1 RSL SOBRE A APLICAÇÃO DOS SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS INTERNOS AO *CPPS* DA INDÚSTRIA 4.0

A definição do problema da pesquisa parte da revisitação da lacuna da literatura, apresentada no Capítulo de Introdução. O resultado obtido desta etapa é apresentado na contextualização teórica no item 2.4.

Para identificar a lacuna, esta seção apresenta uma RSL visando identificar se os sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos estão preparados a operar em ambiente *CPPS* da Indústria 4.0.

Essa RSL é conduzida seguindo a técnica de Levy e Ellis (2006) como apresentado na Figura 19. O protocolo da RSL é descrito nos parágrafos a seguir.

Para isso, na etapa de entrada, definiu-se como sentenças de busca: ("*presetter*" OR "*toolsetter*" OR "*tool presetter*" OR "*tool setter*" OR "*tool presetting*" OR "*tool setting system*") AND ("*Industry 4.0*" OR "*Cyber-Physical Systems*" OR "*Cyber-Physical Production Systems*").

Esta sentença foi aplicada na opção de busca da base de dados *Scopus* abrangendo “*Título, Resumo e Palavras Chaves*”. Já nas bases de dados *Web of Science* e *Science Direct* a sentença foi aplicada na opção “*Todos os Campos*”. Estas bases de dados foram as utilizadas por serem reconhecidas na busca de publicações em Engenharia de Produção.

Como critérios de inclusão, definiu-se que, para garantir uma abordagem ampla dos estudos sobre o tema, foram analisados os artigos e *conference proceedings*, e a área de aplicação definida foi a engenharia, na qual o tema da pesquisa está inserido.

Para os critérios de exclusão, definiu-se a exclusão dos documentos duplicados nas bases de busca, a eliminação dos demais tipos de publicações (livros, editais, apresentação) e documentos que não estavam alinhados a área de engenharia, o período de publicação foram dos últimos dez anos (2010-2020), e para garantir o alto impacto dos artigos selecionados em termos de leitura, apenas artigos escritos em inglês foram revisados.

A Figura 23 apresenta os resultados obtidos nas buscas realizadas nas bases de dados aplicando os critérios de inclusão e exclusão no material analisado, demonstrado nos parágrafos anteriores.

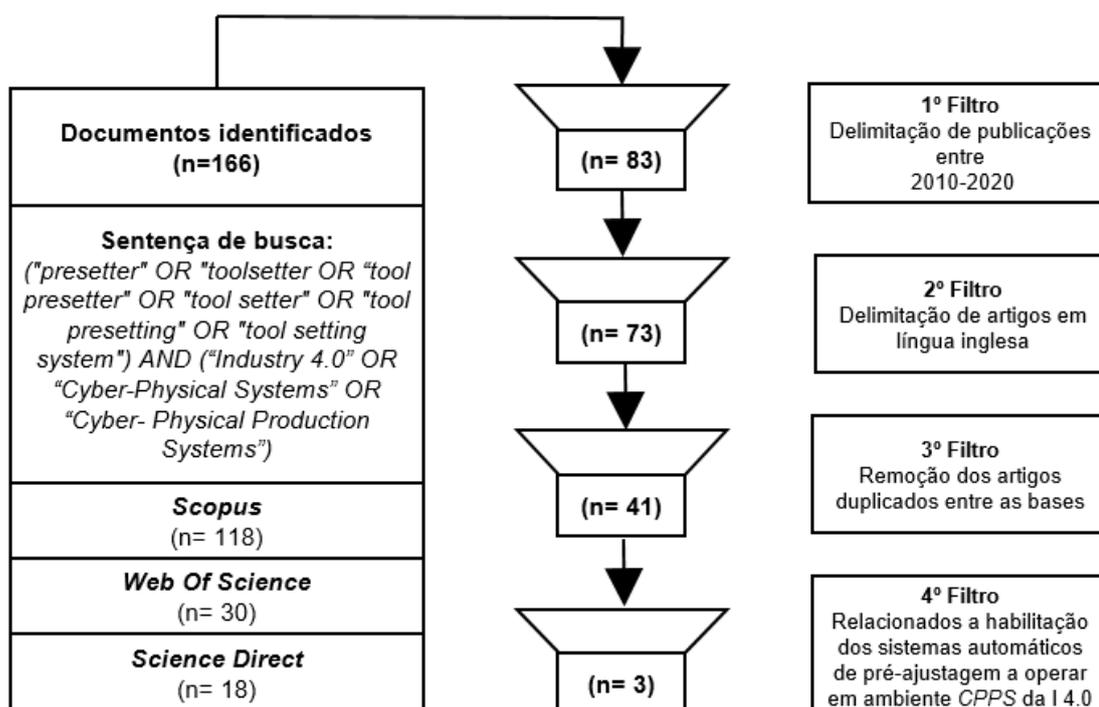


FIGURA 23 – RSL SOBRE O USO DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS EM AMBIENTE CPPS DA INDÚSTRIA 4.0

Como pode ser observado na Figura 23, foram identificados 166 documentos conforme o critério de busca. Após a delimitação de publicações entre 2010 e 2020, delimitou-se para 83 documentos. Restringindo os documentos escritos em língua inglesa, este número ficou em 73 documentos. Removendo os materiais duplicados entre as bases de busca, delimitou-se para 41 documentos.

Com base nos 41 documentos estratificados, foram realizadas a leitura do título, resumo, introdução e conclusões, de cada documento estratificado, identificando se estava relacionado a aplicação de sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos em ambiente CPPS da Indústria 4.0, os que não estavam alinhados ao tema foram descartados.

Após a leitura dos documentos, foram identificados 3 artigos que abordavam o tema relacionado, deste modo foram lidos em sua totalidade, passando por outra análise.

Dos artigos selecionados para a leitura parcial (título, resumo, introdução e conclusões) apresentaram em suas pesquisas o desenvolvimento de novos sistemas de pré-ajustagem de ferramentas (LIU; ZHU, 2017; LIU *et al.*, 2017a; WANG; ZHIMENG; DONG, 2018; KHAJORNTUNGRUANG; SUSUKI; INOUE, 2018), propostas de melhorias das características técnicas dos sistemas de detecção de medição das ferramentas (ZHANG *et al.*, 2017b; VIEIRA JUNIOR *et al.*, 2018; CHENG *et al.*, 2019), propostas de melhoria da comunicação e transmissão de dados entre o sistema de medição e o CNC da máquina-ferramenta (DENG *et al.*, 2018b; HOU; ZANG; YANG, 2020) e estudos da influência dos sistemas de pré-ajustagem de ferramentas no índice de disponibilidade da máquina-ferramenta (SIMON; LIMA, 201; VIEIRA JUNIOR *et al.*, 2016).

Dos artigos que abordaram os sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramenta internos em ambiente da Indústria 4.0 (LORINCZ, 2016; KOENIG, 2017a; KOENIG, 2017b) os mesmos apresentaram os desafios relacionados a integração entre os sistemas, em especial relacionados a comunicação, bem como apresentaram possíveis aplicações e recursos que os sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas poderiam contribuir em um ambiente 4.0. Entretanto nenhum dos artigos apresentou aplicação ou como habilitar estes sistemas a operarem em ambiente *CPPS* da Indústria 4.0.

Os resultados obtidos nesta revisão sistemática da literatura foram apresentados no item 2.4 e demonstram que não existem publicações sobre habilitar os sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos a operar em ambiente *CPPS*, verificando-se assim uma lacuna na literatura.

#### **4.1.2 RSL SOBRE OS REQUISITOS PRESENTES NO *CPPS***

Em função da lacuna da literatura encontrada sobre como habilitar um sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a operar em ambiente *CPPS* da Indústria 4.0, foi realizada uma RSL para identificar os requisitos presentes ao *CPPS* da Indústria 4.0.

Essa RSL foi conduzida seguindo a técnica de Levy e Ellis (2006) como apresentado na Figura 19. O protocolo da RSL é descrito nos parágrafos a seguir.

Na etapa de entrada, definiu-se como sentença de busca: ((*“cyber-physical systems” OR “cyber-physical production systems”*) AND (*“characteristic” OR “aspect” OR “component” OR “property”*) AND *“manufacturing”*).

Esta sentença foi aplicada na opção de busca da base de dados *Scopus* abrangendo “título, resumo e palavras chaves”. Já nas bases de dados *Web Of Science* e *Science Direct* a sentença foi aplicada na opção “todos os campos”. Estas bases de dados foram as utilizadas por serem reconhecidas na busca de publicações e Engenharia de Produção.

Como critério de inclusão adota-se os documentos na área de engenharia (para garantir o alinhamento dos artigos ao assunto do presente trabalho), apenas artigos de periódicos e revisados por pares foram considerados (para garantir a qualidade dos estudos primários alcançados), foram considerados artigos teóricos, empíricos e de revisão (para garantir a confiabilidade e validade dos achados), não foi delimitado o período das publicações, pois o tema é relativamente recente, começando a ser difundido em meados de 2008.

Como critérios de exclusão, definiu-se suprimir os documentos duplicados nas bases de busca, os documentos das demais áreas (que não são de engenharia), os demais tipos de documentos (que não sejam artigos de periódicos), e para garantir o alto impacto dos artigos selecionados em termos de leitura, apenas artigos escritos em inglês foram revisados.

A Figura 24 apresenta os resultados obtidos nas buscas realizadas nas bases de dados aplicando os critérios de inclusão e exclusão no material analisado, demonstrado nos parágrafos anteriores.

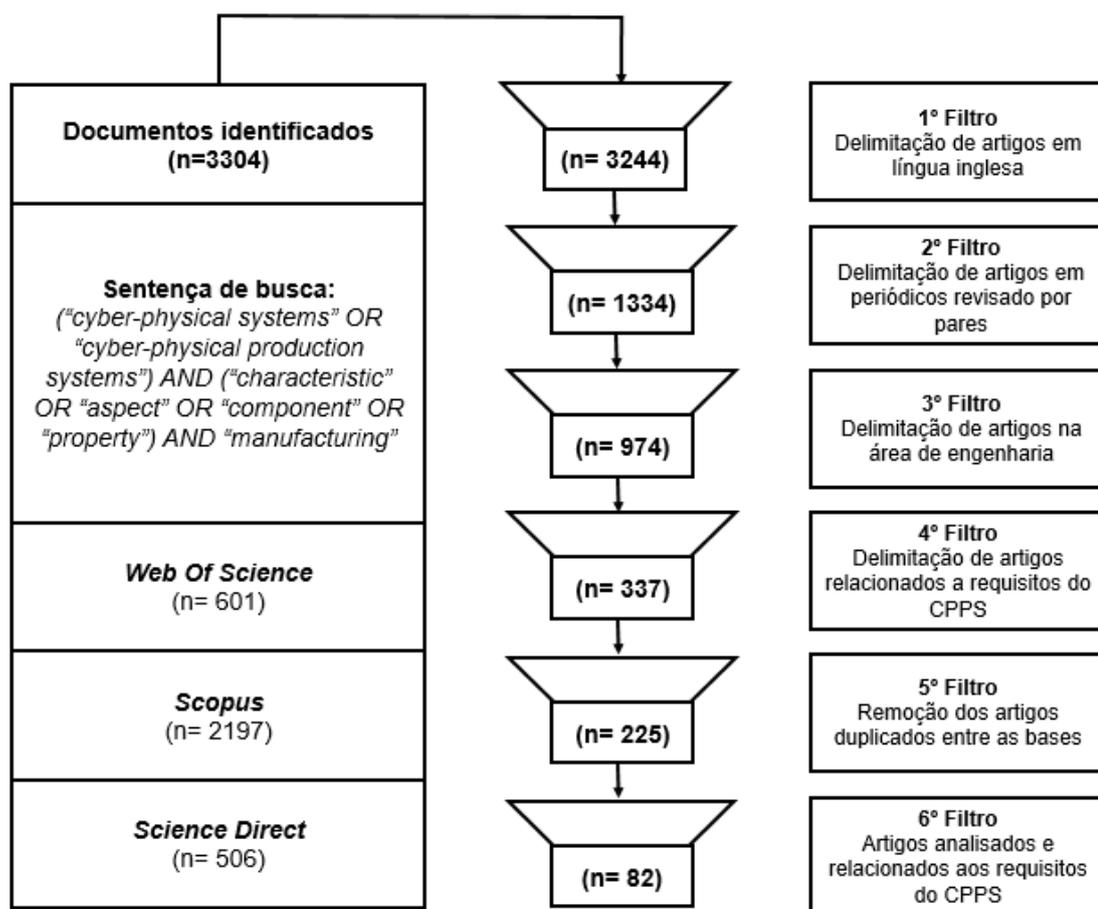


FIGURA 24 – RSL SOBRE OS REQUISITOS PRESENTES NO CPPS

Como pode ser observado na Figura 24, foram identificados 3304 documentos (2197 na *Scopus*, 601 na *Web of Science* e 506 na *Science Direct*) conforme o critério de busca. Após a delimitação dos documentos escritos em língua inglesa este número ficou em 3244 documentos. Restringindo os documentos de periódicos e revisado por pares, delimitou-se para 1334 documentos. Removendo os documentos não relacionados a área de engenharia este número ficou em 974. Restringindo os documentos que apresentaram requisitos presentes ao CPPS em seu conteúdo, delimitou-se para 337. Removendo os materiais duplicados entre as bases de busca, delimitou-se para 225 documentos.

Com base nos 225 documentos estratificados foram realizadas a leitura do título, resumo, introdução e conclusões de cada artigo identificando se os documentos

apresentavam os requisitos presentes nos *CPPS*, quando algum artigo não estava coerente com o tema pesquisado, o material era retirado da análise.

Após a leitura dos documentos, foram identificados 82 artigos que abordavam o tema relacionado aos requisitos presentes ao *CPPS* deste modo foram lidos na íntegra e passando por outra análise para identificar e classificar estes requisitos.

O Quadro 3 apresenta os requisitos presentes ao *CPPS* identificados nos artigos analisados e agrupados conforme modelo de Napoleone, Macchi, Pozzetti (2020). Estes requisitos são apresentados e detalhados no item 2.2.4.

QUADRO 3 – REQUISITOS PRESENTES NO *CPPS* APRESENTADOS PELOS AUTORES

Requisitos		Artigos
Integração	Integração	Lee (2008); Graham; Baliga; Kumar. (2009); Sha <i>et al.</i> (2009); Rajkumar <i>et al.</i> (2010); Conti <i>et al.</i> (2012); Jazdi (2014); Gunes <i>et al.</i> (2015); Becher (2015); Berger <i>et al.</i> (2017); Liu <i>et al.</i> (2017a).
	Complexidade	Sha <i>et al.</i> (2009); Ilse; Meissner; Aurich, (2017).
	Heterogeneidade	Wan <i>et al.</i> (2011); Yuan; Anumba; Parfitt (2015); Gunes <i>et al.</i> (2015).
	Robustez	Lee (2008); Huang (2008); Sha <i>et al.</i> (2009); Rajkumar <i>et al.</i> (2010); Dumitrescu; Juergenhake; Gausemeier (2012); Park (2012); Rungger; Tabuada (2016); Monostori <i>et al.</i> (2016).
	Interoperabilidade	Leitão <i>et al.</i> (2015); Stock; Selinger (2016); ); Ferrer <i>et al.</i> (2016); Liu <i>et al.</i> (2017a); Ghobakhloo (2018); Ruppert <i>et al.</i> (2018); Mourtzis; Vlachou (2018); Cardin (2019).
	Comunicação e conectividade	Wang; Torngren; Onori, (2015); Liu <i>et al.</i> (2017b); Gräbler; Pöhler (2017); Yu <i>et al.</i> (2017); Upasani <i>et al.</i> (2017); Isaksson; Harjunkski; Sand (2017); Tu; Lim; Yang, (2018); Tedeschi <i>et al.</i> (2018); Woo <i>et al.</i> (2018); Lu; Xu (2019).
	Capacidade de redes	Rajkumar <i>et al.</i> (2010); Wu; Kao; Tseng (2011); Kim; Kumar (2012); Ali <i>et al.</i> (2015); Wang; Haghghi, (2016); Trappey <i>et al.</i> (2017).
	Interação	Wan <i>et al.</i> (2010); Baheti; Gill (2011); Acatech (2011); Park (2012); Lee; Seshia (2015); Prause; Weigand (2016); Rama <i>et al.</i> (2016); Yu <i>et al.</i> (2017); Emmanouilidis <i>et al.</i> (2019); Wu; Goepp; Siadat (2019).

	Orientação de serviços	Yuan, Anumba e Parfitt (2015); Krueger <i>et al.</i> (2016); Iarovyi <i>et al.</i> (2016); Kulvatunyou; Ivezic; Srinivasan (2016); Thoben; Wiesner; Wuest (2017); Ghobakhloo (2018); Tao; Qi (2019).
	Modularidade	Chen; Doumeingts, Vernadat (2008); Acatech (2011); Baheti; Gill (2011); Sannislav; Miclea (2012); Jazdi (2014); Becher (2015); Rosenberg <i>et al.</i> (2015); Wang (2016); Berger <i>et al.</i> (2017); Pereira; Romero (2017); Lee <i>et al.</i> (2018); Lins <i>et al.</i> (2020).
	Autonomia	Baheti; Gill (2011); Sannislav; Miclea (2012); Rosenberg <i>et al.</i> (2015); Pirvu; Zamfirescu; Gorecky (2016); Monostori <i>et al.</i> (2016); Liu <i>et al.</i> (2017b); Fettermann <i>et al.</i> (2018); Ribeiro; Bjorkman (2018).
	Auto-capacidades	Cardenas <i>et al.</i> (2009); Sha <i>et al.</i> (2009); Rajkumar <i>et al.</i> (2010); Sannislav; Miclea (2012); Chen, Xing (2015); Liu <i>et al.</i> (2017c).
	Descentralização	Rosenberg <i>et al.</i> (2015); Allenhof (2015); Trappey <i>et al.</i> (2016); Mora <i>et al.</i> (2017); Ghobakhloo (2018); Moghaddam <i>et al.</i> (2018).
Inteligência	Inteligência	Lin; Panahi (2010); Monostori (2015); Cheng <i>et al.</i> , (2016); Tang <i>et al.</i> (2017); Tu; Lim; Yang, (2018).
	Virtualização	Allehof (2015); Rosenberg <i>et al.</i> (2015); Yuan; Anumba; Parfitt (2015); Wang (2016); Yoon; Suh (2016); Babiceanu; Seker (2016); Kritziger <i>et al.</i> (2018); Ghobakhloo (2018); Sanderson; Chaplin; Ratchev (2018); Cimino; Negri; Fumagalli (2019).
	Capacidade em tempo real	Derler; Lee; Vincentilli (2012); Etxeberria-Agiriano; Noguero; Zulueta (2012); Rosenberg <i>et al.</i> (2015); Becher (2015); Hofmann; Rusch (2017); Guzman <i>et al.</i> , (2019).
	Visibilidade em tempo real	Lee (2008); Huang (2008); Sha <i>et al.</i> (2009); Wang <i>et al.</i> (2009); Rajkumar <i>et al.</i> (2010); Acatech (2011); Yoon; Suh (2016); Chen; Tsai (2017); Liu <i>et al.</i> (2017c).
	Capacidade computacional	Monostori <i>et al.</i> (2016); Mora <i>et al.</i> (2017); Jakovljevic; Vidosav; Stojadinovic (2017); Chen; Tsai (2017); Sunny; Liu; Shahriar (2018); Caggiano (2018); Ji <i>et al.</i> (2019); Napoleone; Macchi; Pozzetti (2020).
	Conscientização do contexto	Monostori <i>et al.</i> (2016); Tsai; Ilu (2018).
	Capacidade de detecção	Monostori <i>et al.</i> (2016); Wu; Terpenney; Schaefer (2017).

	Capacidade cognitiva (ou de aprendizado)	Monostori <i>et al.</i> (2016); Chen <i>et al.</i> (2018).
	Capacidade de atuação	Monostori <i>et al.</i> (2016); Thoben; Wiesner; Wuest (2017); Chen <i>et al.</i> (2018).
Cooperação, Colaboração	Cooperação	Ettxeberria-Agiriano; Noguero; Zulueta (2012); Monostori <i>et al.</i> (2016); Tran <i>et al.</i> (2019); Panetto <i>et al.</i> (2019).
	Colaboração	Monostori (2014); Wang; Törngren; Onori (2015); Posada <i>et al.</i> (2015); Nof <i>et al.</i> (2015); Romero <i>et al.</i> (2016); Monostori <i>et al.</i> (2016); Tu; Lim; Yang (2018).
Segurança e Confiabilidade	Segurança	Lee (2008); Cardenas; Amin; Sastry (2008); Huang (2008); Sha <i>et al.</i> (2009); Cardenas <i>et al.</i> (2009); Baheti; Gill (2011); Kim; Kumar (2012); Wells <i>et al.</i> (2014); Vuong, Loukas; Gan (2015); Liu <i>et al.</i> (2017c); Eckert (2017); Griffioen <i>et al.</i> (2019).
	Confiabilidade	Lee (2008); Chen; Doumeingts, Vernadat (2008); Sha <i>et al.</i> (2009); Acatech (2011); Denker <i>et al.</i> (2012); Gunes <i>et al.</i> (2015); Liu <i>et al.</i> (2017c).
Reconfigurabilidade dinâmica	Reconfigurabilidade dinâmica	Sanjay; Eronu (2012); Ivanov; Sokolov; Ivanova (2016); Weyer <i>et al.</i> (2016); Penas <i>et al.</i> (2017); Liu <i>et al.</i> (2017d).
	Adaptabilidade	Sha <i>et al.</i> (2009); Wong <i>et al.</i> (2012); Lanza; Stricker; Moser (2013); Anderl (2014); Yuan; Anumba; Parfitt (2015); Rosenberg <i>et al.</i> (2015); Pirvu; Zamfirescu; Gorecky (2016); Iarovyi <i>et al.</i> (2016); Otto; Vogel-heuser; Niggemann (2018); Ribeiro; Bjorkman (2018); Panetto <i>et al.</i> (2019).
	Escalabilidade	Heiss <i>et al.</i> (2015); Gunes <i>et al.</i> (2015); Garcia-valls <i>et al.</i> (2017); Ribeiro; Hochwallner (2018); Ribeiro; Bjorkman (2018).
	Conversabilidade	Lee (2008); Sha <i>et al.</i> (2009); Baheti; Gill (2011); Sannislav; Miclea (2012); Marwedel; Engel (2012); Iarovyi <i>et al.</i> (2016); Liu <i>et al.</i> (2017d).
	Previsibilidade	Facchinetti; Della Vedova (2011); Heiss <i>et al.</i> (2015); Gunes <i>et al.</i> (2015); Lee; Bagheri; Kao (2015); Wang (2016); Hwang (2016); Kusiak (2017); Ribeiro; Hochwallner (2018); Ribeiro; Bjorkman (2018).

Por meio das análises dos requisitos presentes ao *CPPS* e a formação dos agrupamentos, ficam evidenciados dois macros grupos de requisitos: os tecnológicos e os de gerenciamento de operações.

O macro grupo de requisitos tecnológicos presentes ao *CPPS*, são definidos como sistemas tecnológicos contidos na fábrica inteligente, e abrange os grupos integração, inteligência, cooperação e colaboração, segurança e confiabilidade.

Já o macro grupo de requisitos de gerenciamento de operações, na qual está incluído o grupo de reconfigurabilidade dinâmica, relaciona-se ao desenvolvimento de novas aplicações de manufatura que levam a novas práticas de gerenciamento de operações de fábrica, tais características descrevem o efeito operacional sistêmico da introdução ao *CPPS*; portanto, são características da fábrica inteligente baseada ao *CPPS*.

Os resultados obtidos nesta RSL foram apresentados no item 2.2.4 e demonstram os requisitos presentes ao *CPPS* evidenciados nos materiais analisados.

#### **4.1.3 PESQUISA DOCUMENTAL PARA IDENTIFICAÇÃO DAS FUNCIONALIDADES PRESENTES NOS SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS INTERNOS EXISTENTES NO MERCADO**

Realizou-se uma pesquisa documental, para verificar se a lacuna encontrada na RSL se apresenta também presente nos sistemas comercializados pelos fabricantes desta tecnologia.

A pesquisa documental realizada teve como objetivo identificar as funcionalidades existentes nos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos existentes no mercado, e se os mesmos estão habilitados a operarem em ambiente *CPPS* da Indústria 4.0.

A primeira etapa da pesquisa foi baseada em buscas na internet para identificar as empresas fabricantes destes sistemas. Os termos de pesquisa utilizados foram: “*sistemas de preset*”, “*sistemas de presetting de ferramentas*”, “*preset*”, “*presetter*”, “*presetting*”, “*toolsetter*”, “*tool presetter*”, “*tool presetting*”, “*tool setting system*”.

A partir das buscas realizadas pela internet, foram identificados dois grupos principais de sistemas de pré-ajustagem de ferramentas comercializados, os sistemas externos (*presetter*) e os sistemas internos (*toolsetter*). Do grupo dos sistemas internos foram identificados dois subgrupos, os automáticos (integrados ao comando CNC da máquina-ferramenta) e os manuais (dispositivos que auxiliam na medição manual da ferramenta).

Para a aplicação da pesquisa documental foi definido apenas o grupo dos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos, devido ao escopo da pesquisa. Deste subgrupo, existem dois conceitos de sistemas, por medição de contato e sem contato.

A partir da definição dos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos, foram pesquisados nos *sites* dos fabricantes os manuais e catálogos técnicos dos sistemas para identificar as funcionalidades disponíveis.

Foram identificados 46 modelos de sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos comercializados por 8 empresas fabricantes. Também foram identificados outros modelos durante a pesquisa, mas como faltavam informações da empresa fabricante, manual e catálogo técnico, estes foram descartados da análise.

O Quadro 4 apresenta os sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos, identificados pelo processo de busca, a partir de seu fabricante, modelo e tipo de medição.

QUADRO 4 – SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS INTERNOS EXISTENTES NO MERCADO

<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>	<b>Tipo de Medição</b>	<b>Manual Técnico</b>
Blum	Z Nano	Contato	Blum (2020)a
	Z-Pico	Contato	Blum (2020)b
	ZX-Speed	Contato	Blum (2020)c
	TC-53-20	Contato	Blum (2020)d
	TC-63-20	Contato	Blum (2020)e
	Laser Control Digilog	Sem Contato	Blum (2020)f
	Micro Single NT	Sem Contato	Blum (2020)g
Renishaw	Micro Compact NT	Sem contato	Blum (2020)h
	OTS	Contato	Renishaw (2020)a
	OTS ½ AA	Contato	Renishaw (2020)b
	OTS AA	Contato	Renishaw (2020)c
	Primo System	Contato	Renishaw (2020)d
	RTS	Contato	Renishaw (2020)e
	TS27R	Contato	Renishaw (2020)f
	TS34	Contato	Renishaw (2020)g
	TRS1	Sem Contato	Renishaw (2020)h
	TRS2	Sem Contato	Renishaw (2020)i
	NC 1	Sem Contato	Renishaw (2020)j
	NC2	Sem Contato	Renishaw (2020)k
	NC3	Sem Contato	Renishaw (2020)l
NC4	Sem Contato	Renishaw (2020)m	
Marposs	TS30	Contato	Marposs (2020)a
	TS30 90°	Contato	Marposs (2020)a
	VOTS	Contato	Marposs (2020)a
	VOTS 90	Contato	Marposs (2020)a
	WRTS	Contato	Marposs (2020)a
	VTS SU	Sem Contato	Marposs (2020)b
	MIDA LASER	Sem Contato	Marposs (2020)c
Hexagon	TS35.20	Contato	Hexagon (2020)a
	TS35.30	Contato	Hexagon (2020)b
	IR35.70	Contato	Hexagon (2020)c
	RWT35.40	Contato	Hexagon (2020)d
	LTS35.66	Sem contato	Hexagon (2020)e
	LTS35.65	Sem contato	Hexagon (2020)f
	LTS35.65-23	Sem contato	Hexagon (2020)g
	LTS35.60	Sem contato	Hexagon (2020)h
Heidenhain	TT-160	Contato	Heidenhain (2020)a
	TT-460	Contato	Heidenhain (2020)b
Metrol	T24E	Contato	Metrol (2020)
	T20	Contato	Metrol (2020)
	T26	Contato	Metrol (2020)
	TM26	Contato	Metrol (2020)
	P11	Contato	Metrol (2020)
	P21	Contato	Metrol (2020)
Tormach	Eletronic Tool Setter	Contato	Tormach (2020)
Geotecno	TSG-130	Sem Contato	GeoTecno (2020)

A segunda etapa da pesquisa foi a leitura, na íntegra, dos manuais e catálogos técnicos selecionados, na qual, as funcionalidades identificadas foram enumeradas e classificadas em uma planilha (*Microsoft Excel*) para posterior análise.

O Quadro 5 apresenta as funcionalidades identificadas nos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos, agrupadas por fabricantes destes sistemas.

**QUADRO 5 – FUNCIONALIDADES PRESENTES NOS SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS INTERNOS EXISTENTES NO MERCADO**

<b>Funcionalidades</b>	<b>Blum</b>	<b>Renishaw</b>	<b>Marposs</b>	<b>Hexagon</b>	<b>Heidenhain</b>	<b>Metrol</b>	<b>Tormach</b>	<b>GeoTecno</b>
Detecção de quebra de ferramentas	X	X	X	X	X	X	X	X
Medição do comprimento de ferramentas	X	X	X	X	X	X	X	X
Medição do diâmetro de ferramentas	X	X	X	X	X	X		X
Medição de raios de ferramentas	X	X	X	X	X	X		
Monitoramento de desgaste de ferramentas	X	X	X	X	X	X		X
Compensação do desgaste de ferramentas	X	X	X	X	X	X		X
Compensação da dilatação térmica da máquina	X	X	X					X
Monitoramento rápido de desgaste de ferramenta (ambiente altamente produtivo)	X	X						
Medição do comprimento e diâmetro de ferramentas cônicas	X	X	X					X
Detecção do ponto mais alto a ferramenta	X		X					
Medição de rebolos retíficas	X							
Compensa erros de trocas de ferramentas em tornos	X							

Na análise dos manuais e catálogos técnicos, a integração dos sistemas de pré-ajustagem de ferramentas foi apenas identificada com o comando CNC da

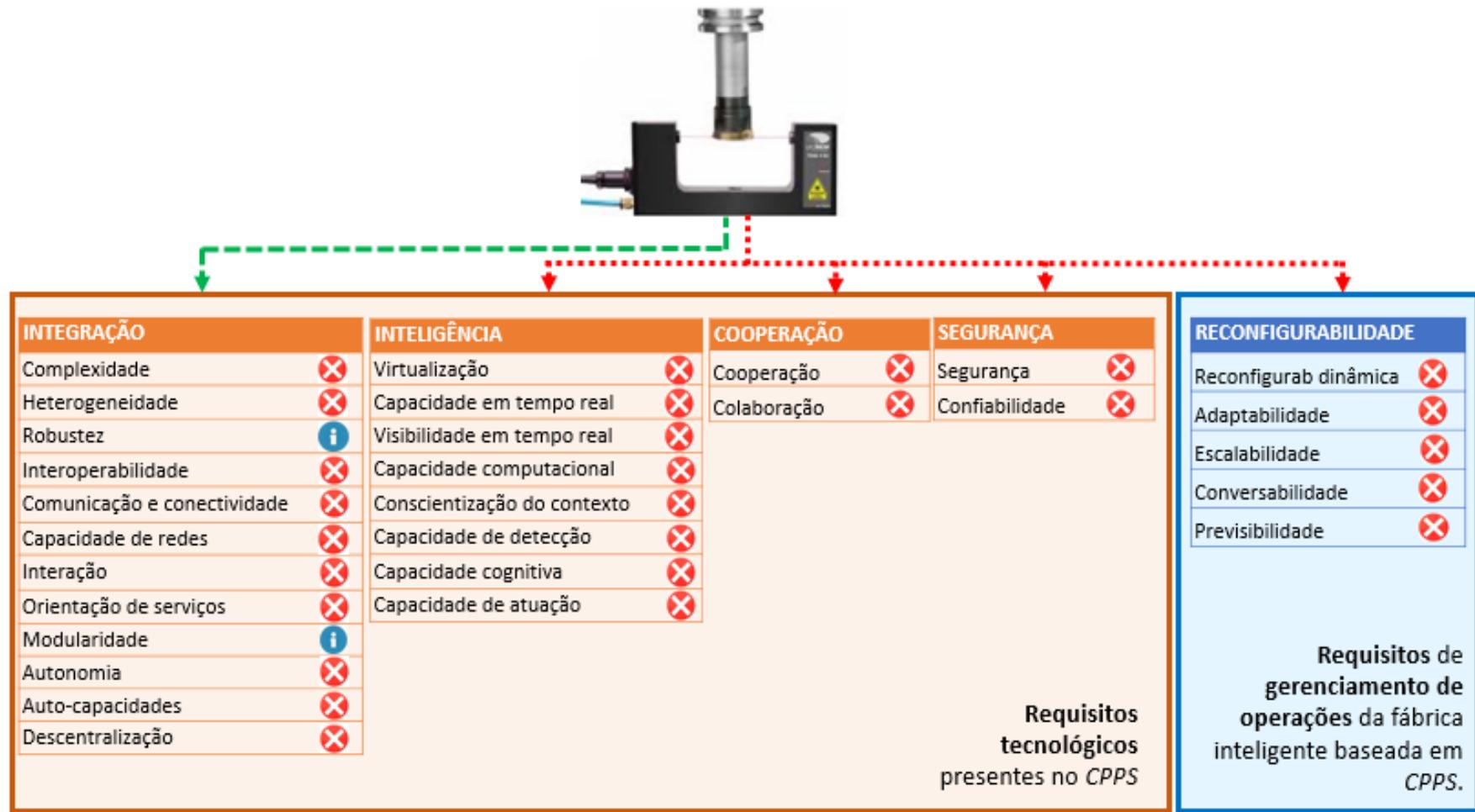
máquina-ferramenta, no qual estão inseridas as rotinas de medição e checagem de ferramentas. Esta integração é acessada por meio da interface de comunicação Homem-Máquina (IHM), na qual o operador exerce a interação com o sistema automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos, por meio das rotinas de medição e checagem das ferramentas.

A integração com outros sistemas e plataformas, como por exemplo, o software do gerenciador de ferramentas, a plataforma de computação em nuvem, e funcionalidades como diagnóstico remoto, não foram identificadas.

Portanto, com a análise documental realizada, alinhada à revisão sistemática da literatura apresentada, verifica-se a ausência de publicações e aplicações que demonstram que os sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser estão habilitados a operarem em ambiente *CPPS* da Indústria 4.0, demonstrando-se assim a lacuna na literatura.

## **4.2 DESENVOLVIMENTO ETAPA 2**

A partir da RSL e pesquisa documental visando identificar se os sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos estão preparados a operar em ambiente *CPPS* da Indústria 4.0, relacionou-se as funcionalidades presentes nos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos existentes no mercado, com os requisitos presentes ao *CPPS* (Figura 25).



**Legenda**



Requisitos presentes ao CPPS que os sistemas de pré-ajustagem de ferramentas comerciais contemplam.



Requisitos presentes ao CPPS que os sistemas de pré-ajustagem de ferramentas que ainda **NÃO FORAM** a contemplados.

FIGURA 25 – REQUISITOS DO CPPS PRESENTES NOS SISTEMAS DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS

Como pode ser observado na Figura 25, das funcionalidades apresentadas pelos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos disponíveis no mercado, somente os requisitos robustez e modularidade do *CPPS* estão incorporados nos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos.

Durante a análise realizada nos catálogos técnicos das empresas fabricantes, foi identificado que estes sistemas apenas possuem comunicação/integração com o CNC da máquina-ferramenta, por essa razão é que o sistema se habilita atualmente aos requisitos robustez e modularidade do subgrupo integração, não abrangendo os requisitos de outros subgrupos referentes a inteligência, cooperação, segurança e reconfigurabilidade.

Portanto, novos requisitos presentes ao *CPPS*, podem vir a ser habilitados nos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos, a partir do desenvolvimento de um módulo de comunicação para habilitar um sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser a operar em ambiente de produção físico cibernético da Indústria 4.0.

### **4.3 DESENVOLVIMENTO ETAPA 3**

Esta seção apresenta o desenvolvimento experimental apresentado no item 3.2.3. e foi subdividida conforme a estrutura apresentada na Figura 22, sendo: Estágio de definição do modelo, para definição das funcionalidades a serem incorporadas no sistema, bem como a definição dos recursos necessários ao módulo de comunicação; Estágio da construção do protótipo, para a implementação das funcionalidades e o projeto e construção do módulo de comunicação; e o Estágio da aplicação do protótipo, para demonstrar a aplicabilidade das funcionalidades do módulo de comunicação.

### 4.3.1 ESTÁGIO 1: DEFINIÇÃO DO MODELO

Para a definição do modelo do sistema da presente pesquisa, foi utilizado a pesquisa documental para identificar as funcionalidades dos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos existentes no mercado (item 4.1.3) e os resultados obtidos na RSL sobre os requisitos presentes no *CPPS* (item 4.1.2).

Como apresentado na Figura 25, os requisitos presentes nos *CPPS* identificados nos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos existentes, foram o de robustez e modularidade.

A partir da revisão narrativa da literatura, apresentada no transcorrer do Capítulo 2, foram identificados recursos e funcionalidades necessários para a interação de sistemas, sensores e dispositivos periféricos no contexto da Indústria 4.0, em especial, para a implementação em MF 4.0 a operar em ambiente *CPPS*.

Assim sendo, são definidos para a presente proposta, os recursos e funcionalidades a serem incorporados em um sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser, para que o sistema se habilite a operar em ambiente *CPPS* da Indústria 4.0.

O Quadro 6 apresenta os recursos que devem ser incorporados ao sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser a partir do desenvolvimento do módulo de comunicação para a presente proposta.

*QUADRO 6 – RECURSOS A SEREM INCORPORADOS AO MÓDULO DE COMUNICAÇÃO PARA O SISTEMA AUTOMÁTICO DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS INTERNO A LASER*

<b>Recursos</b>	<b>Descrição</b>
Coleta e transmissão de dados	– Projeto e construção de um conjunto eletrônico para aquisição e transmissão de dados, capaz de incorporar dados referentes do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser, da máquina-ferramenta CNC, e de outros sensores e dispositivos presentes no processo produtivo.

Transmissão de dados <i>IoT</i>	– Integrar um módulo de transmissão de dados <i>IoT</i> ao conjunto eletrônico para aquisição e transmissão de dados, que permita o envio dos dados coletados para uma plataforma de computação em nuvem, por meio da <i>internet</i> .
Computação em nuvem	– Configurar o envio e recebimento de dados para uma plataforma de computação em nuvem para processar, analisar os dados e informações referentes ao processo.

A partir dos recursos apresentados a serem incorporados ao módulo de comunicação proposto, viabiliza-se a implementação de novas funcionalidades ao sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno, que permita habilitar o sistema a operar em ambiente *CPPS* da Indústria 4.0.

O Quadro 7 apresenta as funcionalidades a serem implementadas.

QUADRO 7 – FUNCIONALIDADES A SEREM IMPLEMENTADAS AO SISTEMA AUTOMÁTICO DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS INTERNO

Funcionalidades	Descrição
Diagnóstico remoto	– Monitorar a condição operacional do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser (manutenção preditiva <i>online</i> ), em relação a detecção em tempo real, do nível de impurezas no dispositivo óptico (lente do módulo laser).
Interface Homem-Máquina <i>online</i>	– Oferecer uma IHM <i>online</i> , com uso de aplicações móveis e acesso remoto, com capacidade em disponibilizar dados e informações em tempo real do processo produtivo, para auxiliar os tomadores de decisão de cada nível da manufatura (operadores, supervisores, gestores, proprietários).
Serviços <i>online</i>	– Monitorar a operacionalidade do sistema: Monitorar e apresentar se o sistema está sendo utilizado nas funcionalidades solicitada pelo cliente (equipamento em uso, ou não); Monitorar a condição operacional do conjunto óptico do sistema, e apresentar de forma online aos tomadores de decisão, qual a escolha a ser tomada (manutenção preditiva, manutenção corretiva, etc);

	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Monitoramento de ferramental de corte: Monitorar o consumo de ferramental e fornecer diagnósticos sobre o rendimento do ferramental utilizado;</li> <li>– Comodato de equipamentos aos usuários: Oferecer serviço de comodato de equipamentos, e efetuar a cobrança a partir do índice de utilização do sistema, como por exemplo, número de medições de ferramentas em processo.</li> </ul>
Indicadores produtivos da <i>MF</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Monitorar os indicadores produtivos da <i>MF</i> (tempo de operação, tempo de <i>setup</i>, tempo de manutenção e tempo de pré-ajustagem de ferramentas) e apresentar estes indicadores de forma <i>online</i> aos envolvidos no processo.</li> </ul>

Como pode ser observado nos Quadro 6 e Quadro 7, os recursos e funcionalidades a serem implementados ao sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser, poderão ser aplicados nas máquinas-ferramenta CNC já existentes, bem como, em máquinas habilitadas a operar em ambiente *CPPS*.

#### 4.3.2 ESTÁGIO 2: CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

A partir da definição dos recursos a serem incorporados ao módulo de comunicação e as funcionalidades a serem implementadas no sistema pré-ajustagem de ferramentas interno a laser, foi proposta a estrutura de aplicação para o módulo de comunicação, apresentada na Figura 26, subdividida em: desenvolvimento de um conjunto eletrônico para aquisição e transmissão de dados; integração de um módulo de comunicação e transmissão de dados sem fio (*IoT*); e configuração do envio e recebimento de dados em uma plataforma de computação em nuvem.



FIGURA 26 – ESTRUTURA DE APLICAÇÃO PROPOSTA (MÓDULO DE COMUNICAÇÃO)

A seguir são apresentados detalhadamente o desenvolvimento de cada conjunto da estrutura de aplicação proposta:

- **Desenvolvimento do conjunto eletrônico de aquisição e transmissão de dados**

Em função dos recursos e funcionalidades definidos anteriormente, foi elaborado o projeto e desenvolvido um conjunto eletrônico de aquisição e transmissão de dados.

No desenvolvimento do conjunto eletrônico de aquisição e transmissão de dados, foram instaladas 6 entradas (3 digitais, 2 analógicas, 1 serial) para coleta de dados do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser e da máquina-ferramenta CNC; Módulo de transmissão de dados *IoT*; Entrada de alimentação do sistema; e Módulo de programação do sistema (Figura 27).

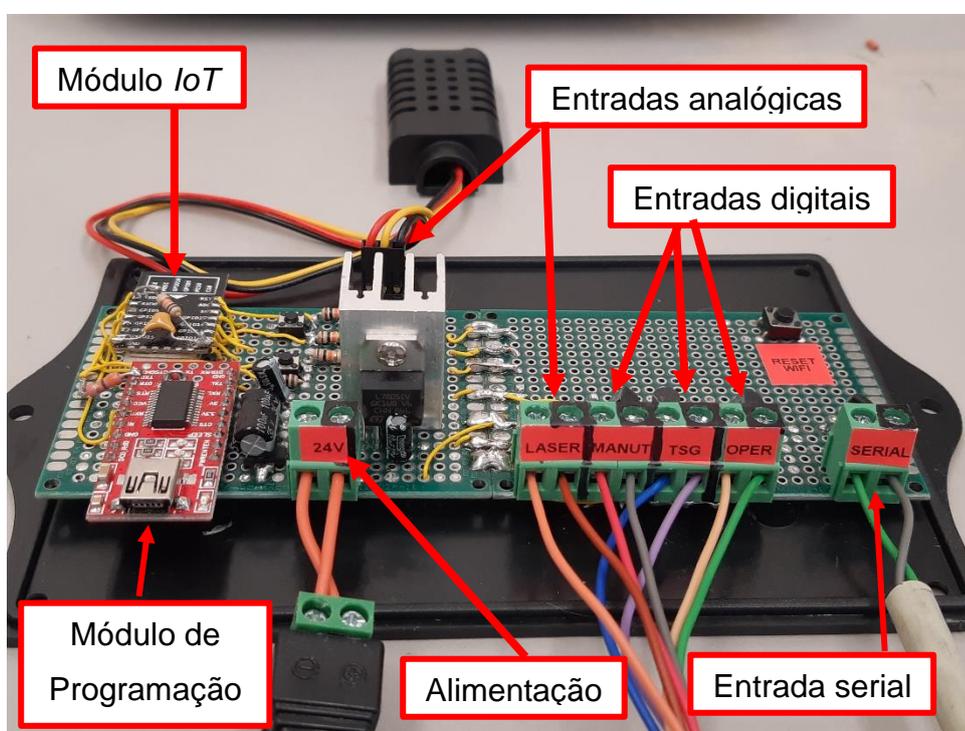


FIGURA 27 – CONJUNTOS ELETRÔNICO DE AQUISIÇÃO E TRANSMISSÃO DE DADOS

A seguir são apresentadas as características de cada recurso implementado no conjunto eletrônico de aquisição e transmissão de dados.

- *Alimentação*

Para o funcionamento do conjunto eletrônico de aquisição e transmissão de dados, foi instalada uma entrada de 24Vcc para alimentação do circuito eletrônico do sistema.

No caso, o fornecimento desta tensão pode ser feito diretamente pela fonte chaveada em 24Vcc presente nas máquinas-ferramenta CNC.

- *Entradas digitais*

Foram adicionadas 3 entradas digitais (0-24Vcc) a coleta de dados referentes ao *status* de operação da máquina-ferramenta CNC, visando o seu monitoramento em conjunto com os dados coletados pelo sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser.

Para a presente proposta, as 3 entradas digitais foram utilizadas para monitorar o tempo de operação da máquina-ferramenta, o tempo de uso do sistema de pré-ajustagem de ferramentas e o tempo de parada para manutenção.

Estas informações de operação da máquina-ferramenta CNC foram coletadas a partir de saídas de sinal lógico (0-24Vcc) gerado pela máquina-ferramenta e coletas no painel elétrico da mesma. Os acionamentos destas saídas, foram programados via lógica de programação *ladder* da máquina-ferramenta, para identificar qual nível estaria relacionado ao tempo de operação da máquina-ferramenta, o tempo de uso do sistema de pré-ajustagem de ferramentas e o tempo de manutenção.

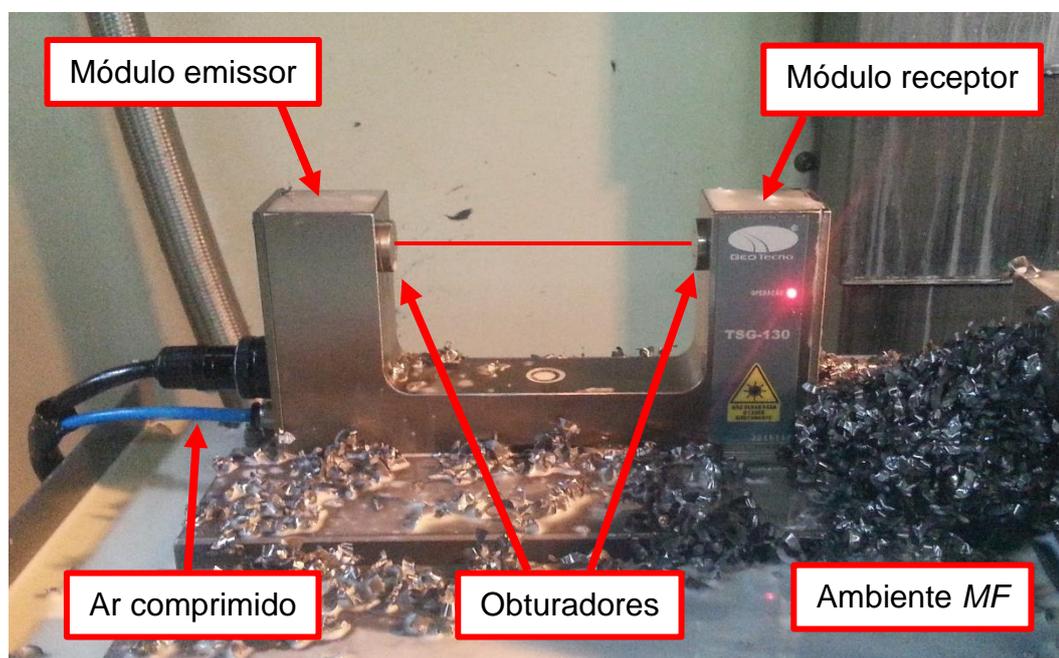
O objetivo de monitorar estes indicadores operacionais da máquina-ferramenta CNC, é o de oferecer recursos de monitoramento dos indicadores operacionais para as máquinas-ferramenta CNC existentes, e que ainda não dispõem destes recursos, como mencionado anteriormente na contextualização teórica da presente pesquisa.

- *Entradas analógicas*

Para o presente conjunto eletrônico foi disponibilizado duas entradas analógicas (0-5Vcc) visando integrar o sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas com outros dispositivos e/ou sensores envolvidos no processo.

Uma das entradas analógicas foi configurada para a coleta de dados referente a condição operacional do módulo eletrônico do conjunto óptico do sistema, por meio do monitoramento do sinal de Vcc da saída do leitor de intensidade de luminosidade existente na placa eletrônica do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser.

No caso, os sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas internos a laser (Figura 28), possuem um módulo emissor do feixe laser (diodo laser) e um módulo receptor do feixe laser (leitor de intensidades de luminosidade). Para a proteção do sistema eletrônico do sistema no ambiente de usinagem da máquina-ferramenta, em especial os sistemas ópticos, são utilizados dois obturadores com micro furos e pressuriza-se o sistema com ar comprimido para criar uma pressão positiva dentro do sistema para evitar que sujeiras e líquidos refrigerantes presentes no processo de usinagem penetrem no sistema, em especial não atinja a óptica do sistema.



*FIGURA 28 – CONJUNTO DE OBTURADORES DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS INTERNO A LASER*

Entretanto, caso o fluxo de ar comprimido utilizado para pressurizar o sistema apresente umidade excessiva, com o tempo esta umidade irá comprometer a

capacidade de medição do sistema, interferindo diretamente no nível de intensidade de luminosidade do sistema laser (diminuindo a  $V_{cc}$  de saída do leitor de intensidade de luminosidade) e automaticamente na qualidade da medição das ferramentas.

Deve ser ressaltado, que um dos principais fatores relacionados a manutenção dos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser está relacionada diretamente ao motivo apresentado.

Outra entrada analógica disponível, poderá ser utilizada para a coleta de dados de outros sensores e dispositivos que podem vir a ser importantes para a o monitoramento do processo, como por exemplo, o uso de um sensor de  $pH$  para monitorar a qualidade do fluido de corte refrigerante utilizado no processo de usinagem.

Para o presente projeto, foi utilizado um sensor de temperatura e umidade, da fabricante *DualCom* modelo *TF-XX*, para monitorar as condições do ambiente, com objetivo de avaliar a funcionalidade do conjunto eletrônico de aquisição e transmissão de dados.

Portanto, o objetivo de monitorar a intensidade de luminosidade do feixe laser e de outros sensores e/ou dispositivos, como apresentado, é para que estes dados possam ser monitorados e utilizados para auxiliar na tomada de decisão dos envolvidos no processo produtivo.

- *Módulo de programação e comunicação serial*

Para o presente projeto foi utilizado um módulo de programação e comunicação serial, modelo *FTDI FT232RL*, para a configuração e programação das entradas e saídas disponíveis no conjunto eletrônico de aquisição e transmissão de dados.

A programação e configuração das entradas digitais e analógicas disponíveis no sistema eletrônico, é realizada via software *Arduino IDE 1.8.15*, e o programa é transferido ao módulo a partir de uma entrada *USB* disponível no sistema.

No que diz respeito comunicação serial, foi configurada uma entrada de dados para comunicação serial via RS232, para coletar diretamente do CNC da máquina-ferramenta, as informações dimensionais referentes as ferramentas de corte utilizadas durante o processo.

Para a transmissão de dados do CNC da máquina-ferramenta, referente às informações do ferramental de corte, foi realizada a configuração deste envio de dados diretamente pela máquina-ferramenta CNC.

Os dados transmitidos ao sistema eletrônico são referentes às medidas dos corretores das ferramentas diretamente da página de *offset* da ferramenta na máquina: número da ferramenta, comprimento da ferramenta, diâmetro da ferramenta, período de uso das ferramentas.

Portanto, o objetivo de coleta de dados para monitorar o ferramental de corte e sua condição, como detalhado anteriormente, visa obter e armazenar um histórico de dados do ferramental utilizado, para que estes dados sejam transformados em informações uteis para a tomada de decisão.

- ***Módulo de transmissão de dados IoT com Wi-Fi***

Para a transmissão de dados foi integrado e configurado um módulo de transmissão de dados *IoT* com *Wi-Fi*, fabricante *Estressif* modelo *ESP8266*, que oferece conectividade *wireless* ao módulo de aquisição e transmissão de dados, e com capacidade de se conectar com uma conexão *Wi-Fi*, transmitindo e recebendo os dados diretamente da rede.

A transmissão e coleta de dados em processo pela rede *internet*, é realizada pela configuração da comunicação *wireless* entre o módulo *IoT* e um roteador *wireless* conectado na rede *internet* (Figura 29).

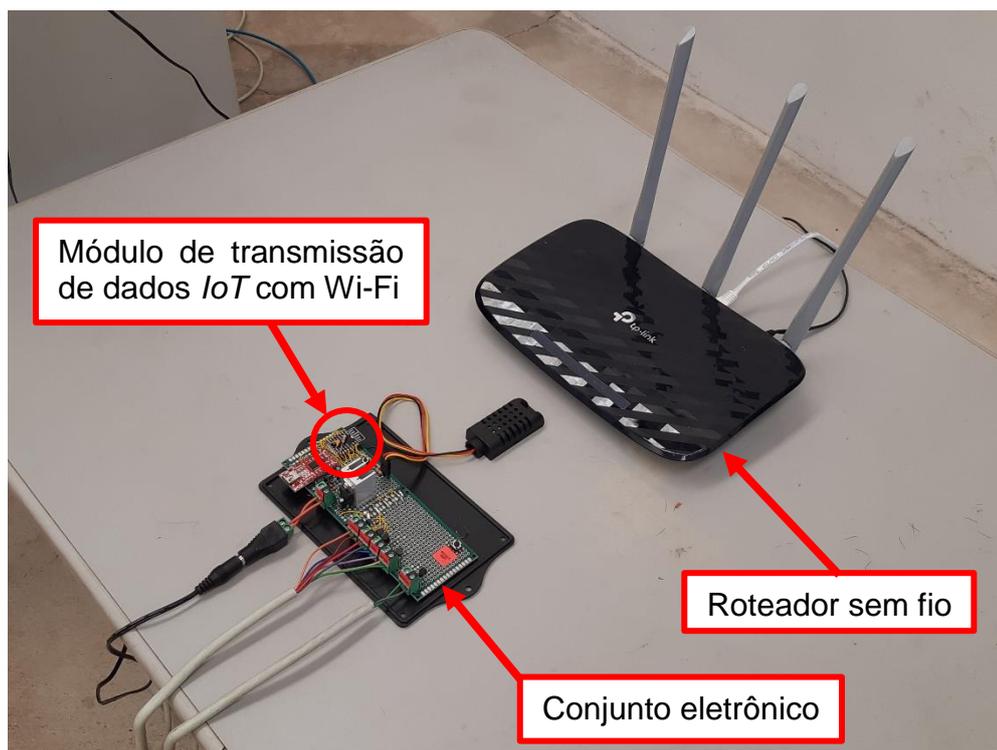


FIGURA 29 – TRANSMISSÃO E COLETA DE DADOS WIRELESS PARA A INTERNET

O roteador utilizado foi o do fabricante *TP-LINK* modelo *Archer C20 V5*, e o mesmo foi definido por oferecer a flexibilidade de rede dedicada e oferecer o recurso “*access point*” para transmitir e coletar os dados.

O recurso “*access point*” possibilita ampliar a cobertura de redes de *internet* com mais velocidade, controle e recursos de segurança para um ambiente controlado. Nesta proposta, o roteador utilizado está conectado diretamente ao roteador principal de uma rede local.

O objetivo da coleta e transmissão de dados do processo pela *internet* é para possibilitar que os dados e informações do processo sejam organizados e analisados por meio da computação em nuvem.

- **Plataforma de computação em nuvem**

Para o presente trabalho foi utilizado uma plataforma *web* de computação em nuvem da empresa *TagoIO*<sup>®</sup>, por possuir uma arquitetura simples para

programação, para processar e armazenar os dados da aplicação em nuvem, por meio do monitoramento de ambientes e dispositivos conectados à sua rede.

A seguir será apresentada a configuração da plataforma de comunicação em nuvem utilizada a partir da configuração do banco de dados, análise e automação do fluxo de informações e da sincronização de eventos e execução de ações.

- *Configuração do banco de dados*

O banco de dados foi configurado para receber os dados coletados e enviados pelo conjunto eletrônico em relação as entradas digitais (tempo de operação da máquina-ferramenta, tempo de uso do sistema de pré-ajustagem de ferramentas, e tempo de parada para manutenção), entradas analógicas (leitor de intensidade de luminosidade do feixe laser, e, temperatura e umidade), e entrada serial (número da ferramenta, comprimento da ferramenta, diâmetro da ferramenta, período de uso da ferramenta). A Figura 30 apresenta a configuração do banco de dados.

The screenshot shows the Tago interface for configuring data retention rules. The interface includes a header with the Tago logo and navigation tabs for General Information, Variables, Tags, and More. The Variables tab is active, displaying a table of variables with columns for Variable, Device, Number of registers, and Apply data retention rule. The table lists variables such as ferramenta\_raio, tempo\_setup, intensidade\_laser, tempo\_toolsetter, temperatura, tempo\_operacao, umidade, ferramenta\_index, and ferramenta\_comprimento, each with a corresponding device ID and number of registers. A 'Visible' toggle is set to 'On'.

Variable	Device	Number of registers	Apply data retention rule
<input type="checkbox"/> ferramenta_raio	5e8b498caf0d7a001b5ef904	22	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> tempo_setup	5e8b498caf0d7a001b5ef904	73	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> intensidade_laser	5e8b498caf0d7a001b5ef904	22	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> tempo_toolsetter	5e8b498caf0d7a001b5ef904	22	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> temperatura	5e8b498caf0d7a001b5ef904	22	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> tempo_operacao	5e8b498caf0d7a001b5ef904	14	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> umidade	5e8b498caf0d7a001b5ef904	22	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> ferramenta_index	5e8b498caf0d7a001b5ef904	22	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> ferramenta_comprimento	5e8b498caf0d7a001b5ef904	22	<input checked="" type="checkbox"/>

FIGURA 30 – CONFIGURAÇÃO DO BANCO DE DADOS

A partir do banco de dados, as informações são trabalhadas na função de análise e automação de fluxos de informações.

- *Análise e automação de fluxos de informações*

Para as funções de análise e automação de fluxos de informações, foi desenvolvido uma IHM *online*, para apresentar os dados e informações referentes ao processo produtivo em forma de gráficos (indicadores produtivos referentes a máquina em operação, máquina em operação de *setup*, máquina em manutenção, máquina em operação de pré-ajustagem de ferramentas), tabelas dinâmicas (referentes ao *offset* das ferramentas: número da ferramenta, comprimento da ferramenta, diâmetro da ferramenta, período de uso da ferramenta) e display (intensidade de luminosidade do feixe laser, temperatura e umidade do ambiente). A Figura 31 apresenta uma das IHM *online* desenvolvidas.

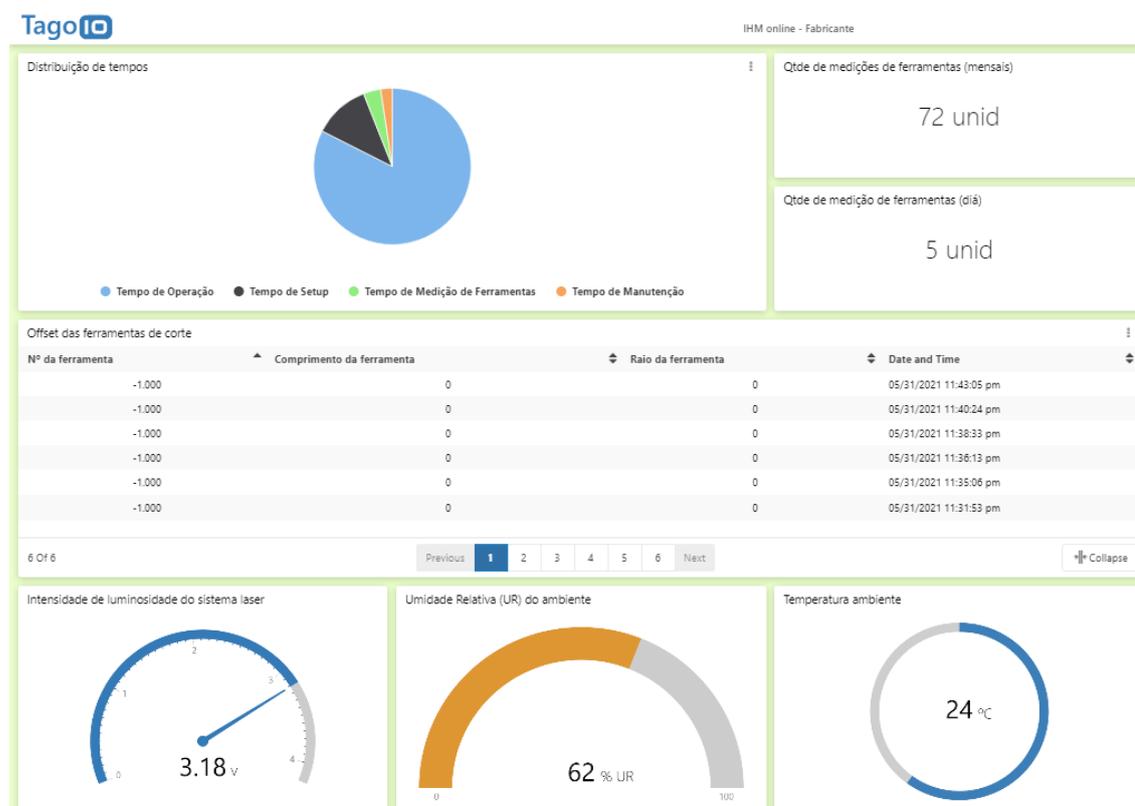


FIGURA 31 - CONFIGURAÇÃO IHM ONLINE

Para cada nível de função na empresa (operador de máquina e gestor/proprietário) foi desenvolvida uma IHM *online* como os recursos e informações necessárias para auxiliar na tomada de decisão no processo produtivo, bem como funções para sincronizar eventos e executar ações.

- *Sincronizar eventos e executar ações*

Para a finalidade de sincronizar eventos e executar ações, foram configurados eventos na plataforma em nuvem para informar: a necessidade para a realização da manutenção preditiva ou corretiva do sistema óptico; se o sistema de pré-ajustagem não está sendo utilizado pelo operador periodicamente; a quantidade de operações de pré-ajustagem de ferramentas realizadas por período.

No que diz respeito a execução das ações (notificações), foi configurado o envio de *SMS* e *e-mails* quando ocorrerem os eventos descritos anteriormente. Nesse caso, as notificações são configuradas em função do nível de tomada de decisão de cada parte envolvida no processo (operador, gestor e fabricante do equipamento). A Figura 32 apresenta a configuração de sincronização de eventos e execução de ações na plataforma em nuvem.

The screenshot displays the TagoIO configuration interface for a cloud-based event synchronization and action execution. The main configuration area is titled "Manutenção corretiva (operador) - email" and is active. It is divided into two primary sections: "Trigger" and "Action".

**Trigger Configuration:**

- Single device:** Selected to watch a single device, "TSG".
- Multiple devices:** Option to watch all devices with matching tags is unselected.
- Trigger Condition:** A variable "umidade" is set to be "Less than" 3000.
- Trigger Unlock (optional):** A section for enabling conditions that allow the action to be triggered again.

**Action Configuration:**

- Name:** "Manutenção corretiva (operador) - email".
- Type of action:** "Send Email".
- Send to:** "icorrer@yahoo.com.br".
- Title:** "Manutenção corretiva (operador) - email".
- Message:** A multi-line text field containing a notification in Portuguese: "Olá. O nível de impurezas na óptica do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser está ACIMA do estabelecido. Um técnico da empresa está sendo deslocado para realizar a manutenção corretiva de...".

The interface includes a left sidebar with navigation options (Home, Devices, Buckets, Files, Analysis, Actions, Explore, Access, Users, Run) and a bottom navigation bar with "Voltar" and "Save" buttons.

### FIGURA 32 – CONFIGURAÇÃO DE SINCRONIZAÇÃO DE EVENTOS E EXECUÇÃO DE AÇÕES

Em relação a execução de ações, por meio de notificações, a ocorrência de um único evento pode gerar notificações com conteúdo diferente para tomada de decisão para cada envolvido no processo. Por exemplo, o evento de manutenção preditiva pode informar ao operador sobre a necessidade da realização deste procedimento, para o gestor informar que o operador está ciente da necessidade para a realização deste procedimento, e para o fabricante do equipamento monitorar sobre a realização ou não do procedimento da manutenção preditiva.

#### 4.3.3 ESTÁGIO 3: APLICAÇÃO DO PROTÓTIPO

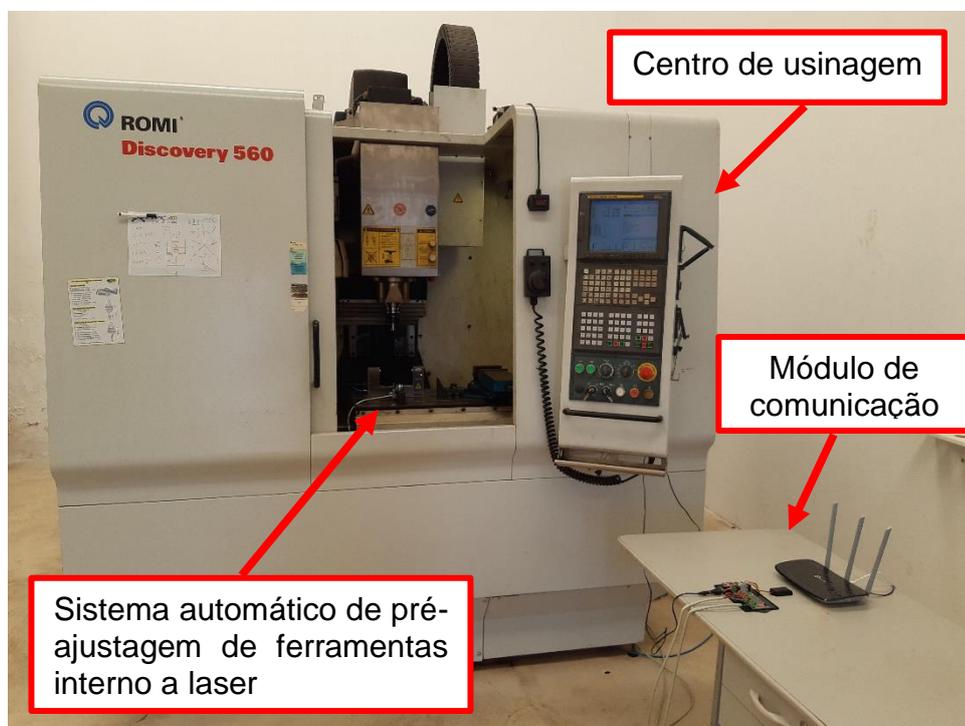
A partir da construção do módulo de comunicação foi realizada a validação da proposta a partir da montagem do banco de ensaios, implementação da plataforma de computação em nuvem, e aplicação da sincronização de eventos (notificações).

- **Montagem do banco de ensaios**

Para a aplicação e validação do protótipo, foi utilizada a empresa GeoTecno Soluções em Automação, localizada em Santa Bárbara d'Oeste / SP, fabricante de sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas interno à laser, na qual forneceu toda a estrutura necessária para a aplicação e validação do protótipo.

Foram utilizados para a aplicação: um centro de usinagem vertical da Indústrias Romi S/A, modelo *Discovery 560*, com comando *Fanuc 20i*; um sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser da fabricante GeoTecno Indústria e Comércios de Sistemas e Processos Automatizados LTDA, modelo *TSG-130*; e o módulo de comunicação desenvolvido.

As Figura 33 e Figura 34 apresentam o banco de ensaios montado e o sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser utilizado, respectivamente.



*FIGURA 33 – BANCO DE ENSAIOS*



*FIGURA 34 – SISTEMA AUTOMÁTICO DE PRÉ-AJUSTAGEM DE FERRAMENTAS A LASER - TSG-130*

O módulo de comunicação foi integrado ao centro de usinagem e ao sistema de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser, a partir das saídas digitais e serial da máquina-ferramenta CNC, e da saída analógica do sistema automático de pré-ajustagem de ferramenta interno a laser que monitora a intensidade de luminosidade do feixe laser.

Após a integração do banco de ensaios apresentado, foram realizados testes operacionais do centro de usinagem para a coleta de dados referentes ao processo de usinagem.

- ***Aplicação em plataforma de computação em nuvem***

Durante a coleta de dados do processo de usinagem, foram aplicadas as IHM *online* desenvolvidas para os tomadores de decisão do processo, sendo estes: operador, gestor e fabricante.

No caso, para cada nível de tomada de decisão, foi desenvolvida uma IHM *online* com as informações necessárias referentes a sua responsabilidade no processo produtivo.

A Figura 35 apresenta a IHM *online* desenvolvida para os gestores, na qual os mesmos têm acesso as informações referentes aos indicadores produtivos da máquina-ferramenta CNC (tempo de operação, tempo de *setup*, tempo de medição de ferramentas, tempo de manutenção), ao monitoramento do uso do ferramental de corte utilizado, a quantidade média de medição de ferramentas mensalmente e a quantidade diária de medição de ferramentas.

Estes indicadores visam auxiliar o gestor na tomada de decisão, em função dos dados e informações apresentadas pela IHM *online*, tanto estando presente na empresa, como estando analisando estes dados remotamente.



FIGURA 35 - IHM ONLINE PARA GESTORES

A Figura 36 apresenta a IHM *online* desenvolvida para o operador, na qual são apresentados dados e informações referentes a condição de uso operacional do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser, o índice de umidade relativa e temperatura do ambiente, e a quantidade média mensal de medição de ferramentas e a quantidade diária de medição de ferramentas.

Estes indicadores objetivam apresentar, de forma *online* e em tempo real, um diagnóstico da condição de uso do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser e de outros sensores ou dispositivos, indicando o momento ideal para uma manutenção preditiva dos sistemas. Assim sendo, o operador tem condição de realizar a programação destas ações sem comprometer a disponibilidade da máquina-ferramenta.

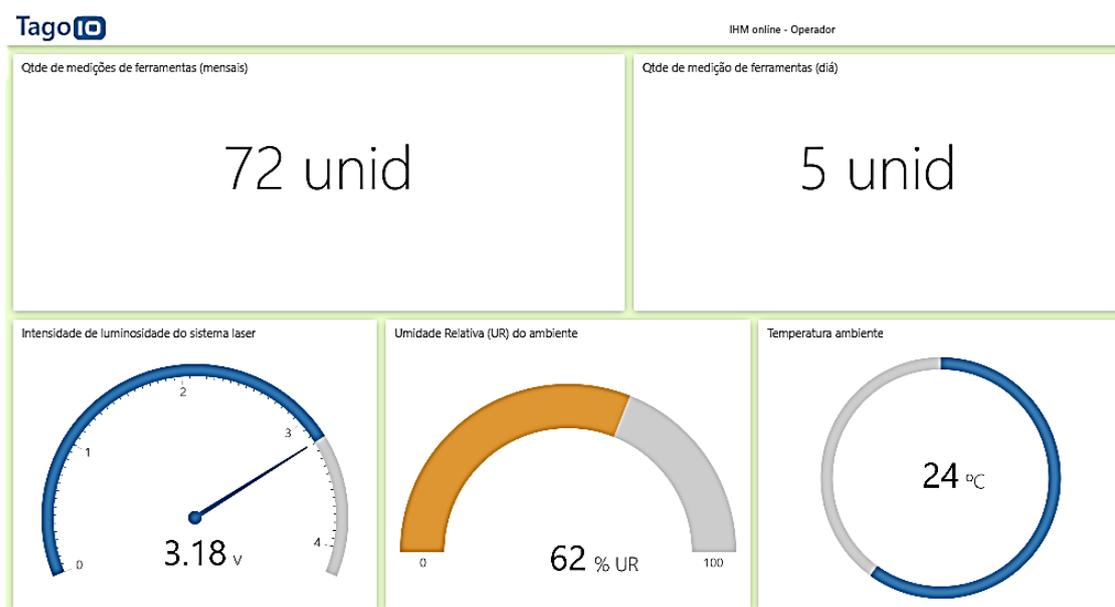


FIGURA 36 - IHM ONLINE OPERADORES (AUTOR)

A Figura 37, por sua vez, apresenta a IHM *online* desenvolvida para o fabricante do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser, na qual são apontados todos os dados e informações presentes nas IHMs *online* do gestor e operador.

Esta IHM *online* possibilita, ao fabricante do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser, monitorar a condição de operação do sistema, bem como, de outros indicadores produtivos do processo (máquina, ferramentas de corte, sensores e dispositivos do processo). Os dados e informações obtidos nesse monitoramento remoto, podem ser utilizados na oferta de serviços de manufatura *online* aos usuários, como por exemplo, diagnóstico para manutenção preditiva, análise de consumo do ferramental de

corde utilizado, indicadores de produtividade da máquina-ferramenta, dentre outros diagnósticos que possam auxiliar o usuário na tomada de decisão com maior agilidade e assertividade.

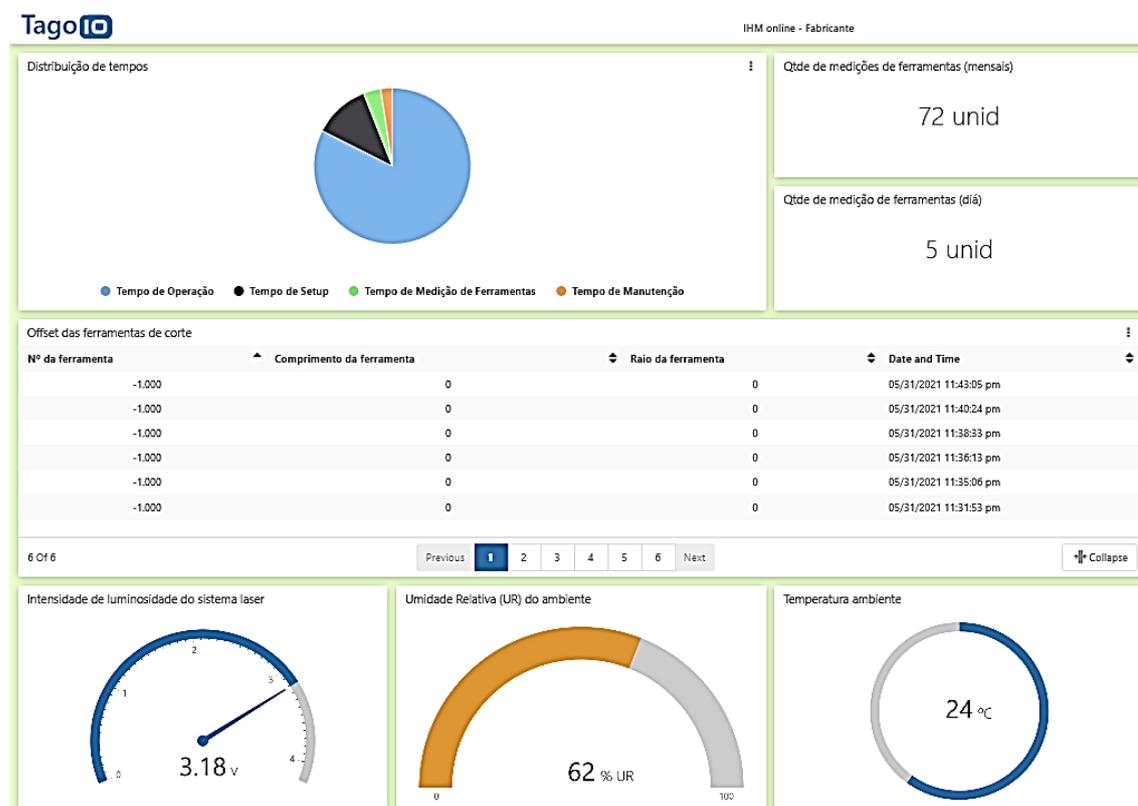


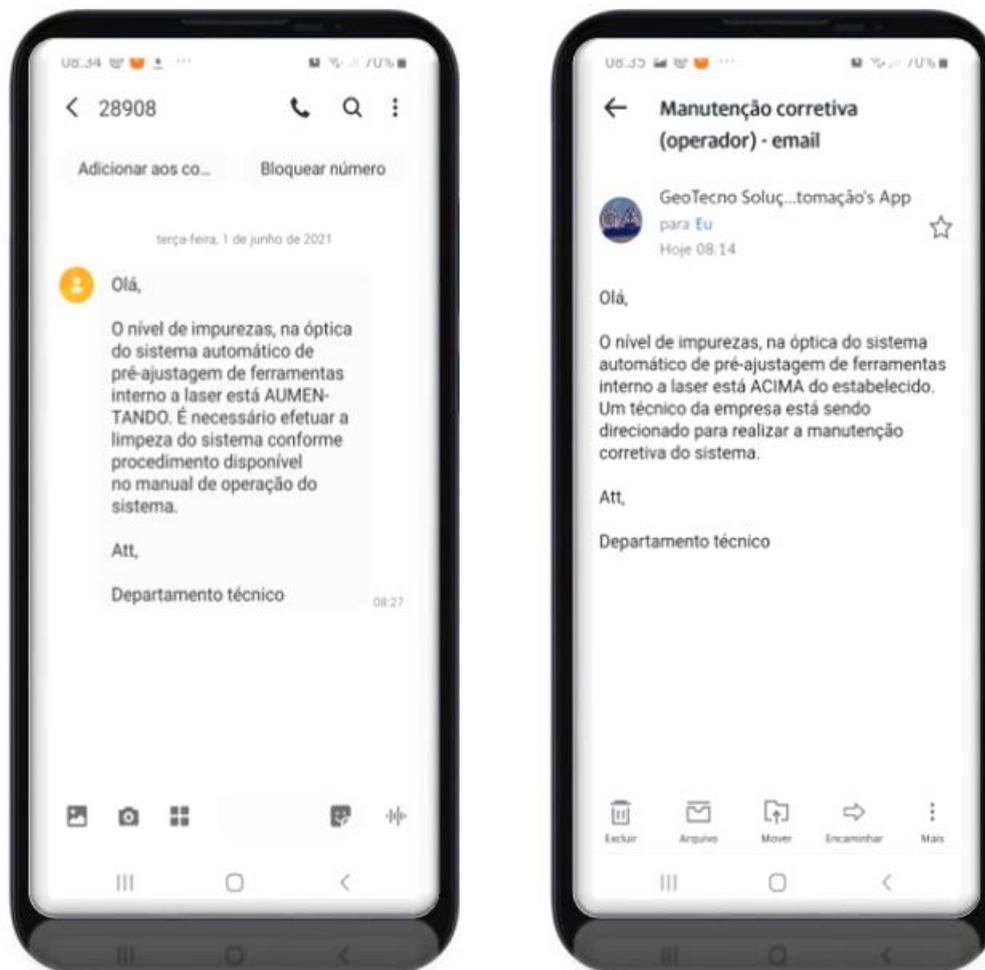
FIGURA 37 - IHM ONLINE FABRICANTE

- **Aplicação da sincronização de eventos (Notificações)**

Durante os testes operacionais do centro de usinagem, também foram avaliados a aplicabilidade da sincronização de eventos (envio de notificações) para o operador, gestor e fabricante do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser.

No caso as notificações foram configuradas para serem enviadas, via *sms* e/ou *e-mail*, sempre quando os eventos eram detectados durante o processo. A Figura 38 apresenta um exemplo de notificação enviada ao operador, via *sms* e *e-mail*, quando detectado que o sistema automático de pré-ajustagem de

ferramentas interno a laser, necessitava de uma manutenção preditiva, em relação a limpeza da óptica do módulo laser.

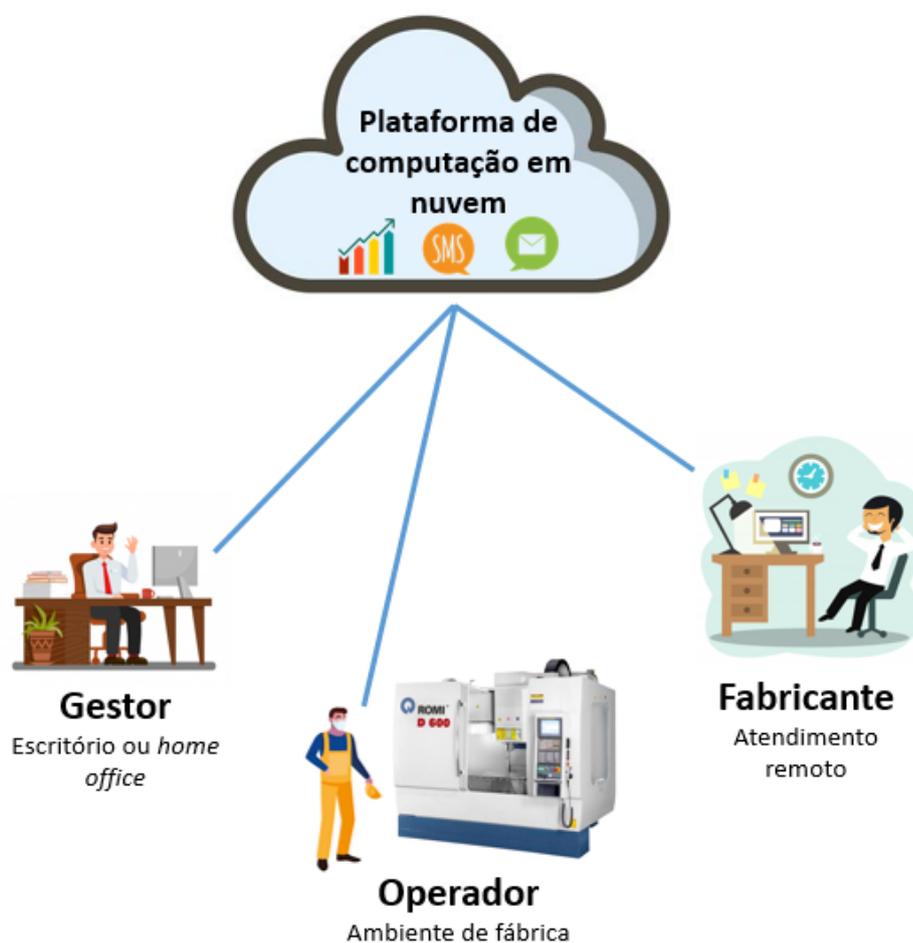


a)

b)

FIGURA 38 – NOTIFICAÇÕES RECEBIDAS PELO OPERADOR: A) SMS E B) E-MAIL

A Figura 39 apresenta o fluxo de informações relacionadas ao envio de notificações, a partir da sincronização de eventos, na qual observa-se que todos os envolvidos no processo são notificados da ocorrência, com a informação para a tomada de decisão em função de suas atribuições no processo.



*FIGURA 39 – FLUXO DE INFORMAÇÕES ENTRE OS ENVOLVIDOS NO PROCESSO*

Em relação as notificações enviadas ao operador, foram configurados três eventos: a primeira notificação relacionada com à orientação para o planejamento da manutenção preditiva do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser; a segunda relacionada ao comunicado da necessidade da manutenção corretiva do sistema; e o terceira relacionada ao

esclarecimento do motivo da falta de uso do sistema por um período determinado.

O Quadro 8 apresenta configuração da lista de notificações enviadas ao operador a partir da detecção do evento sincronizado.

QUADRO 8 – LISTA DE NOTIFICAÇÕES CONFIGURADAS PARA O OPERADOR

<b>Tipo de notificação</b>	<b>Formato de envio</b>	<b>Texto da notificação</b>
Manutenção preditiva	<i>E-mail e SMS</i>	<p><i>Olá,</i></p> <p><i>O nível de impurezas, na óptica do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser está AUMENTANDO. É necessário efetuar a limpeza do sistema conforme procedimento disponível no manual de operação do sistema.</i></p> <p><i>Att,</i></p> <p><i>Departamento Técnico</i></p>
Manutenção corretiva	<i>E-mail e SMS</i>	<p><i>Olá,</i></p> <p><i>O nível de impurezas, na óptica do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser está ACIMA do estabelecido. Um técnico da empresa está sendo direcionado para realizar a manutenção corretiva do sistema.</i></p> <p><i>Att,</i></p> <p><i>Departamento Técnico</i></p>
Equipamento sem uso	<i>E-mail e SMS</i>	<p><i>Olá,</i></p> <p><i>Foi detectado que há 2 dias o sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser NÃO está sendo utilizado. Teria algum motivo específico? Estamos disponíveis para auxiliar em quaisquer dúvidas sobre o sistema.</i></p> <p><i>Att,</i></p> <p><i>Departamento Técnico</i></p>

No que diz respeito as notificações enviadas ao gestor, foram configurados quatro eventos para manter o gestor informado das ocorrências detectadas e

diagnósticos do processo produtivo: a primeira e segunda notificação relacionada a comunicação sobre as ações tomadas pela empresa fabricante sobre o procedimento de manutenção preditiva e corretiva do sistema; a terceira relacionada ao aviso da falta de uso do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser no processo produtivo; e a quarta indicando sobre o índice de utilização da máquina-ferramenta durante um período determinado.

O Quadro 9 apresenta a lista de notificações enviadas ao gestor a partir da detecção dos eventos sincronizados.

QUADRO 9 - LISTA DE NOTIFICAÇÕES CONFIGURADAS PARA O GESTOR

<b>Tipo de notificação</b>	<b>Formato de envio</b>	<b>Texto da notificação</b>
Manutenção preditiva	<i>E-mail e SMS</i>	<p><i>Prezado,</i></p> <p><i>Foi detectado que o sistema automático de medição de ferramentas interno a laser está necessitando de manutenção.</i></p> <p><i>O operador já foi informado sobre o procedimento de manutenção a ser seguido.</i></p> <p><i>Estaremos acompanhando todo o processo remotamente e o mantendo informado.</i></p> <p><i>Att,</i></p> <p><i>Departamento Técnico</i></p>
Manutenção corretiva	<i>E-mail e SMS</i>	<p><i>Prezado,</i></p> <p><i>Foi detectado que o sistema automático de medição de ferramentas interno a laser está necessitando de manutenção corretiva.</i></p> <p><i>O operador já foi informado sobre esta notificação! Nosso técnico já está sendo direcionado para realizar a manutenção corretiva do sistema.</i></p> <p><i>Estaremos mantendo-o informado de todo andamento da manutenção.</i></p> <p><i>Att,</i></p> <p><i>Departamento Técnico</i></p>

Equipamento sem uso	<i>E-mail e SMS</i>	<p><i>Prezado,</i></p> <p><i>Foi detectado que há 2 dias o sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser NÃO está sendo utilizado no processo produtivo. Estamos entrando em contato com o operador para averiguar os motivos da falta de uso.</i></p> <p><i>Estaremos mantendo-o informado desta ocorrência</i></p> <p><i>Att,</i></p> <p><i>Departamento Técnico</i></p>
Indicadores produtivos	<i>E-mail e SMS</i>	<p><i>Prezado</i></p> <p><i>Monitorando os indicadores produtivos da máquina-ferramenta CNC, a mesma está apresentando um índice de utilização de 40%.</i></p> <p><i>Att,</i></p> <p><i>Departamento de Análise em Produtividade</i></p>

Já para as notificações enviadas ao fabricante do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser, foram configurados três eventos com o objetivo de informar o responsável do departamento técnico da empresa fabricante para: acompanhar remotamente o procedimento de manutenção preditiva pelo operador; agilizar o procedimento de manutenção corretiva; informar da falta de uso do sistema em processo.

O Quadro 10 apresenta a lista de notificações enviadas ao departamento técnico da empresa fabricante a partir da detecção do evento sincronizado.

*QUADRO 10 - LISTA DE NOTIFICAÇÕES CONFIGURADAS PARA DEPARTAMENTO TÉCNICO DA EMPRESA FABRICANTE*

<b>Tipo de notificação</b>	<b>Formato de envio</b>	<b>Texto da notificação</b>
Manutenção preditiva	<i>E-mail e SMS</i>	<p><i>Olá,</i></p> <p><i>Foi detectado que o sistema laser necessita de manutenção preditiva.</i></p>

		<p><i>Entrar em contato com operador para auxiliá-lo nesse procedimento.</i></p> <p><i>Att,</i></p> <p><i>Gerência</i></p>
Manutenção corretiva	<i>E-mail e SMS</i>	<p><i>Olá,</i></p> <p><i>Foi detectado que o sistema laser está necessitando de manutenção corretiva.</i></p> <p><i>Entrar em contato com a empresa informando que um técnico da empresa está se deslocando até o local para verificar sobre o ocorrido.</i></p> <p><i>Att,</i></p> <p><i>Gerência</i></p>
Indicadores produtivos	<i>E-mail e SMS</i>	<p><i>Olá,</i></p> <p><i>Foi detectado que o sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser NÃO está sendo utilizado. Entrar em contato com o operador para entender o motivo.</i></p> <p><i>Att,</i></p> <p><i>Gerência</i></p>

Como apresentado nos Quadro 8, Quadro 9 e Quadro 10, o envio das notificações para os tomadores de decisão envolvidos no processo produtivo, irá auxiliar diretamente na uniformidade das informações do processo em relação as informações monitoradas e analisadas pelo sistema.

Este fluxo integrado de informações possibilita a empresa atingir um nível mais alto de operação, eficiência e produtividade, além de um nível mais alto de automação.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A proposta para o desenvolvimento de um módulo de comunicação para habilitar um sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser a operar em ambiente de produção físico cibernético da Indústria 4.0, demonstrou a sua aplicabilidade em ambiente produtivo.

A seguir serão discutidos os resultados para a inserção de novos recursos ao sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser, a implementação de funcionalidades ao sistema; e os requisitos presentes no ambiente *CPPS* que foram habilitados para a presente proposta.

### 5.1 RECURSOS INCORPORADOS

O módulo de comunicação projetado e construído na presente proposta, se demonstrou adequado para a coleta e transmissão dos dados do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser, da máquina-ferramenta CNC e de outros sensores e/ou dispositivos, a partir do uso de entradas digitais (0-24Vcc), entradas analógicas (0-5Vcc) e entrada de comunicação serial (Rs-232).

A aquisição dos dados foi avaliada durante os testes realizados no banco de ensaios montados para a presente proposta, na qual não apresentou intercorrências relacionados à coleta de dados durante o processo.

Em relação a configuração do módulo de transmissão de dados *IoT* com *Wi-Fi* o mesmo se demonstrou satisfatório e confiável para garantir a transmissão dos dados coletados para a plataforma de computação em nuvem.

Para a presente proposta a transmissão de dados para a plataforma em nuvem foi configurada a partir de um roteador *Wi-Fi* com função *access point* que transmitia os dados para um roteador central e que disponibilizava estes dados

na rede *internet*. No caso, o módulo de transmissão de dados utilizado, também possui o recurso para transmissão de dados via *GPRS*, caso não se tenha acesso ao uso da rede *internet* do usuário.

A efetividade da transmissão dos dados foi demonstrada a partir do envio de dados coletados pelo módulo de comunicação para a plataforma em nuvem, durante os testes operacionais na máquina-ferramenta CNC. Nesse caso, foi analisado que os dados gerados no processo foram transmitidos na íntegra de seu conteúdo para a plataforma de computação em nuvem.

No que diz respeito a definição da plataforma de comunicação em nuvem utilizada na presente proposta, a mesma se apresentou adequada para o recebimento, envio e análise dos dados pela *internet*, mesmo utilizando a versão *free* da plataforma disponível para desenvolvedores de aplicação.

Tanto a configuração do banco de dados, análise e automação de fluxos de informações e sincronização de eventos e execução de ações, disponíveis na plataforma em nuvem, foram avaliadas a partir das aplicações realizadas durante os testes simulados e testes operacionais com a máquina-ferramenta CNC.

No que diz respeito às limitações e possíveis melhorias relacionadas aos recursos incorporados na presente proposta, destaca-se a possibilidade de incorporar outros protocolos de comunicação de dados, como o *MTCConnect*, que possibilitaria a troca de dados do sistema com outros dispositivos presentes no chão de fábrica, e o *OPC-UA*, que possibilitaria o envio e recebimento de dados de outros sistemas no chão de fábrica.

## **5.2 FUNCIONALIDADES IMPLEMENTADAS**

O desenvolvimento e implementação das funcionalidades ao sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser, relacionados ao diagnóstico remoto, interface homem-máquina *online*, serviços *online* e monitoramento de

indicadores produtivos para a máquina-ferramenta CNC, se demonstrou satisfatória para a presente proposta.

A aplicabilidade destas funcionalidades foi demonstrada durante o período de testes operacionais com a máquina-ferramenta CNC, com o envolvimento de 3 participantes, desempenhando a função de operador, gestor da empresa e fabricante do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser.

Em relação ao diagnóstico remoto, referente a condição operacional do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser e do seu uso, o sistema foi capaz de identificar e informar, em tempo real, a condição operacional do sistema pelas IHMs *online*, bem como notificar os envolvidos no processo em relação aos eventos configurados (necessidade de manutenção preditiva, necessidade de manutenção corretiva, falta de uso do equipamento) por meio do envio das notificações para os envolvidos no processo, via *e-mail* e *sms*, na qual as pessoas que estavam desempenhando a função de operador, gestor e fabricante do sistema receberam as notificações referente ao evento detectado.

No que se refere aos dados coletados das medições das ferramentas de corte, efetuadas pelo sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser, os dados foram apresentados em uma tabela dinâmica, a partir da IHM *online*, e todo o histórico das medições realizadas ficou armazenado no banco de dados da plataforma em nuvem, podendo assim, ser tratados e analisados pelo software *Excel*, ou equivalente, a partir do *download* de um arquivo em formato *xls*.

Em relação a funcionalidade para o monitoramento dos indicadores produtivos da máquina-ferramenta CNC, sua aplicação se apresentou adequada, visto que a partir dos dados coletados da máquina-ferramenta CNC, foi possível identificar o percentual do tempo de uso de cada operação, fornecendo informações úteis para o tomador de decisão em relação a produtividade da máquina-ferramenta

CNC. Este monitoramento pelo tomador de decisão foi possível ser realizado remotamente.

Já no que se refere às limitações e desenvolvimento das funcionalidades, a serem implementadas no sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser, destacam-se a possibilidade de atualização das IHMs *online*, a inclusão de serviços de valor agregado ao usuário, e a implementação de algoritmos de aprendizado da máquina (*machine learning*).

Para a melhoria das IHMs *online*, sugere-se a implementação de outros indicadores relacionados aos dados monitorados e informações processadas, a configuração de novos eventos e notificações e a inclusão de outras pessoas envolvidas no processo de tomada de decisão da empresa.

A prestação de serviços *online* aos usuários dos sistemas automáticos de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser também pode ser desenvolvida, implementada e oferecida pela empresa fabricante, por meio de um novo modelo de negócios de serviço customizado.

Uma vez que os dados do processo de manufatura estão sendo coletados de forma remota e processados em nuvem, o fabricante pode disponibilizar serviços de diagnóstico remoto de equipamentos, diagnóstico de indicadores de produtividade da máquina-ferramenta, diagnóstico de consumo de ferramental de corte, como outros serviços customizados para o usuário.

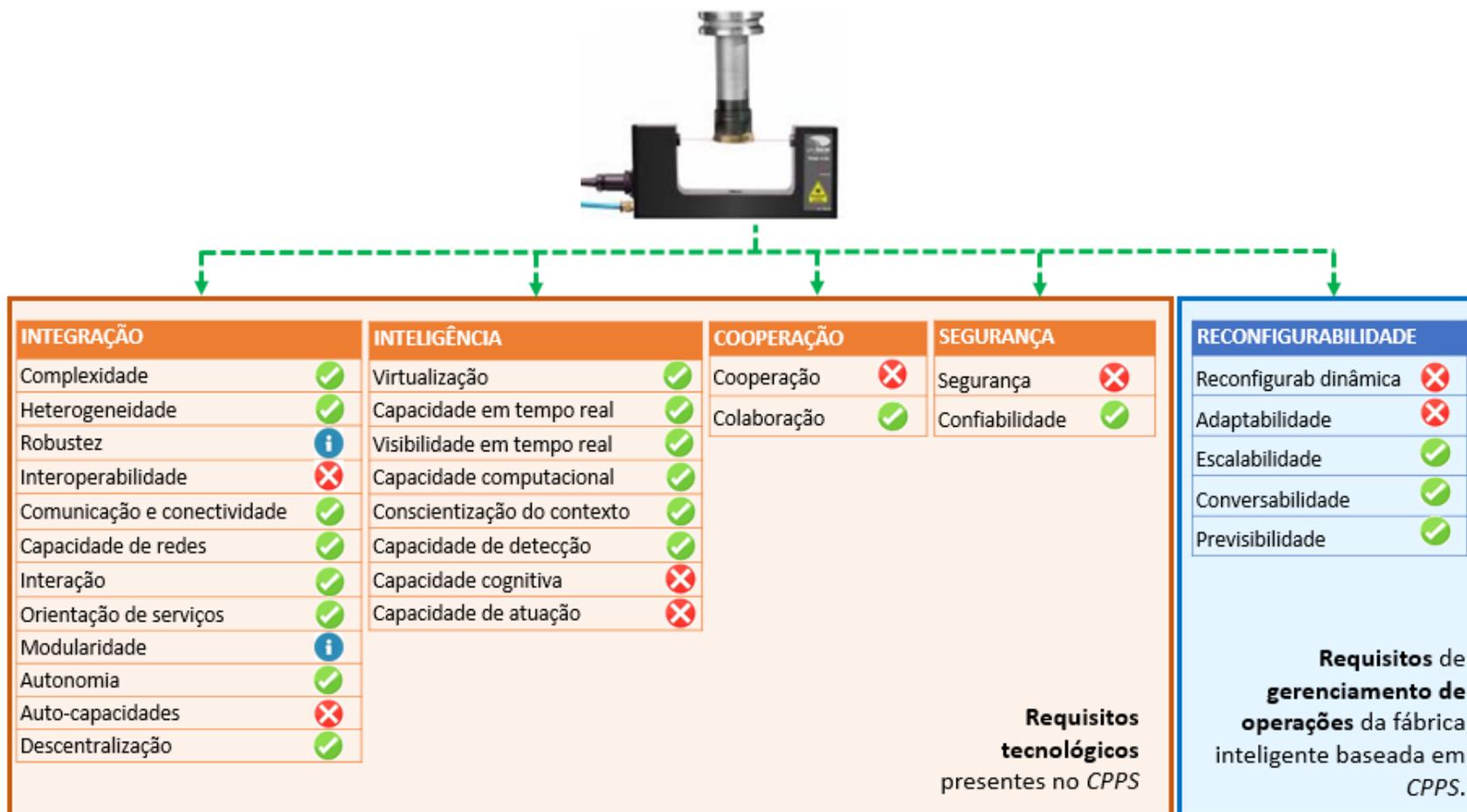
O uso de algoritmos de aprendizado de máquina pode ser incluído na presente proposta, permitindo que por meio dos dados e informações coletados em processo do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser, máquina-ferramenta CNC e outros sensores e/ou dispositivos, este algoritmo identifique padrões operacionais e gerem novos eventos e configurações para o processo.

### **5.3 REQUISITOS PRESENTES NO AMBIENTE *CPPS* IMPLEMENTADOS NA PROPOSTA DO SISTEMA**

Com os recursos e funcionalidades incorporados ao sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser, outros requisitos presentes no ambiente *CPPS*, passaram a ser implementados a partir da presente proposta.

A Figura 40 apresenta os requisitos presentes no ambiente *CPPS*, demonstrando quais já estavam implementados nos sistemas comercializados, os que foram incluídos na presente proposta, e os que ainda não foram implementados.

Os Quadro 11 e Quadro 12 apresentam a descrição da aplicação do uso dos requisitos tecnológicos e de gerenciamento de operações presentes no ambiente *CPPS*, relacionando com a definição da literatura destes requisitos.



### Legenda



Requisitos presentes no ambiente CPPS que os sistemas de pré-ajustagem de ferramentas comerciais contemplam.



Requisitos presentes no ambiente CPPS **IMPLEMENTADOS** no sistema de pré-ajustagem de ferramentas da presente proposta.



Requisitos presentes no CPPS que ainda **NÃO FORAM** implementados no sistema de pré-ajustagem de ferramentas da presente proposta.

FIGURA 40 – REQUISITOS PRESENTE NO AMBIENTE CPPS IMPLEMENTADOS NA PROPOSTA

QUADRO 11 – DESCRIÇÃO DOS REQUISITOS TECNOLÓGICOS PRESENTES NO CPPS IMPLEMENTADOS NA PROPOSTA

Grupo	Requisito	Definição na literatura	Status	Descrição da aplicação
Integração	Complexidade	Capacidade do sistema de gerar, comunicar e avaliar grandes quantidades de dados sobre processos de produção em andamento (ILSEN; MEISSNER; AURICH, 2017).		Capacidade obtida pela construção do módulo comunicação e o processamento dos dados realizados na plataforma de computação em nuvem.
	Heterogeneidade	Capacidade do sistema se integrar com outros sistemas, como dispositivos, sensores, dispositivos móveis, estações de trabalho e servidores (YUAN; ANUMBA; PARFITT, 2015).		Capacidade alcançada a partir da construção do módulo de comunicação, obtendo dados da máquina-ferramenta, sensores, e comunicação com dispositivo móveis a partir da aplicação desenvolvida.
	Robustez	Capacidade do sistema se manter sua configuração estável e resistir a falhas (RUNGGER; TABUADA, 2016)		Capacidade já implementada em sistemas comerciais.
	Interoperabilidade	Capacidade de dois sistemas se conectarem, trocarem dados, compartilharem informações, conhecimentos e usar as funcionalidades um do outro (STOCK; SELINGER, 2016; GHOBAKHLOO, 2018).		Este recurso pode vir a ser implementado no sistema a partir da integração dos protocolos de comunicação <i>MTConnect</i> e <i>OPC-UA</i> .
	Comunicação e conectividade	Capacidade do sistema garantir aquisição em tempo real de dados do mundo físico e o feedback de informações do espaço cibernético (LIU <i>et al.</i> , 2017b; YU <i>et al.</i> , 2017).		Capacidade alcançada a partir da aquisição em tempo real dos dados do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas e da máquina-ferramenta CNC, e <i>feedback</i> gerado pela IHM <i>online</i> e notificações aos tomadores de decisão.

Integração	Capacidade de redes	Capacidade de rede para transportar pacotes de dados entre sensores, unidades computacionais e atuadores (KIM; KUMAR, 2012).		Capacidade de rede via comunicação <i>Wi-Fi</i> para conexão <i>internet</i> , e comunicação via conexão <i>GPRS</i> .
	Interação	Capacidade de interação entre os elementos computacionais no espaço cibernético e elementos físicos no mundo real incluindo a integração humana (EMMANOUILIDIS <i>et al.</i> , 2019).		Capacidade de interação entre os envolvidos no processo por meio da IHM <i>online</i> , com acesso aos dados e informações do processo, bem como, aos diagnósticos e notificações.
	Orientação de serviços	Capacidade do sistema para orientação a serviços destinados à manufatura inteligente (THOBEN; WIESNER; WUEST, 2017).		Capacidade implementada para o sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno em oferecer serviços <i>online</i> , mas que ainda deve ser formatada conforme a necessidade do usuário final.
	Modularidade	Capacidade o sistema ser instalado e configurado de forma rápida (PEREIRA; ROMERO, 2017).		Capacidade já implementada em sistemas comerciais
	Autonomia	Capacidade de o sistema responder às mudanças do ambiente externo e dar a resposta apropriada a tempo de modo a assegurar o funcionamento normal do sistema. E esse tipo de reação pode ser realizado pela intervenção humana (LIU <i>et al.</i> , 2017b).		Esta capacidade foi obtida por meio do monitoramento <i>online</i> dos indicadores produtivos e da condição operacional do sistema, possibilitando a intervenção humana na tomada de decisão do processo.
	Autocapacidades	Capacidade que permite a autonomia do sistema no que diz respeito a auto-adaptabilidade, autorreconfiguração, auto-organização, autoconsciência, auto-aprendizagem, autodiagnóstico, auto-otimização (CHEN; XING, 2015).		Esta capacidade pode ser incluída a partir da integração dos protocolos de comunicação <i>MTCconnect</i> e <i>OPC-UA</i> que possibilitará a comunicação do sistema com outros periféricos no envio e recebimento de dados.

Integração	Descentralização	Capacidade do sistema na tomada de ação sem dependência de outros sistemas (ROSENBERG <i>et al.</i> , 2015; ALLENHOF, 2015; GHOBAKHLOO, 2018)		Esta capacidade foi integrada inicialmente por meio da tomada de decisão do sistema a partir da configuração dos eventos, mas que ainda podem ser mais bem exploradas.
Inteligência	Virtualização	Capacidade do sistema rastrear remotamente processos físicos e que permitam <i>feedback</i> de comunicação do mundo digital para o campo (YUAN; ANUMBA; PARFITT, 2015; BABICEANU; SEKER, 2016; KRITZIGER <i>et al.</i> , 2018).		Capacidade apresentada pela realização do monitoramento remoto dos indicadores produtivos da máquina-ferramenta CNC e condição operacional do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno.
	Capacidade em tempo real	Capacidade do sistema em adquirir e analisar dados em tempo real e fornecer a informação imediatamente (ROSENBERG <i>et al.</i> , 2015; HOFMANN; RUSCH, 2017).		Capacidade demonstrada a partir do envio e monitoramento dos dados coletados em processo de forma automática e em tempo hábil para a tomada de decisão no processo.
	Visibilidade em tempo real	Capacidade do sistema apresentar o status atual dos componentes de fabricação e serem visualizados em tempo real (YOON; SUH, 2016).		Capacidade apresentada por meio do IHM <i>online</i> desenvolvida para cada tomador de decisão, apresentando os dados e informações do processo em tempo real.
	Capacidade computacional	Capacidade de executar uma quantidade significativa de trabalho de computação e controle realizado anteriormente por seres humanos (MORA <i>et al.</i> , 2017; <i>Jl et al.</i> , 2019).		Capacidade apresentada pela integração e processamento de dados e informações pela plataforma de computação em nuvem utilizado no presente trabalho.

Inteligência	Conscientização do contexto	Capacidade do sistema em auxiliar pessoas e máquinas na execução de suas tarefas por meio da exploração de sensores e atuadores para desencadear ações baseadas no contexto do ambiente. (TSAI; LLU, 2018).		Capacidade demonstrada com o monitoramento dos dados e ações e dos eventos e notificações direcionadas a cada tomador de decisão para as ocorrências detectadas em processo.
	Capacidade de detecção	Capacidade do sistema em receber dados e informações de diferentes sensores envolvidos no processo (WU; TERPENNY; SCHAEFER, 2017).		Capacidade evidenciada no módulo de comunicação com recursos para coleta de dados de sensores externos (entradas digitais e entradas analógicas). Esta capacidade pode ainda ser mais bem exploradas, acrescentando novas entradas de dados no conjunto eletrônico.
	Capacidade cognitiva (ou de aprendizado)	Capacidade do sistema em gerar informações, a partir do aprendizado do processo, para tomada de decisão (CHEN <i>et al.</i> , 2018).		Esta capacidade pode ser implementada por meio do integração de algoritmos de aprendizado na máquina, recurso este disponível na plataforma de computação em nuvem utilizada neste trabalho.
	Capacidade de atuação	A capacidade do sistema em atuar no monitoramento e controle de ações em resposta a problemas do processo no ambiente físico (CHEN; XING, 2015).		Esta capacidade está implementada parcialmente (monitoramento) e pode ser implementada em sua totalidade (controle) a partir da inclusão de saídas de controle (digitas e analógicas) no conjunto eletrônico, bem como, a partir da integração dos protocolos de comunicação <i>MTConect</i> e <i>OPC-UA</i> no sistema.

Cooperação	Cooperação	Capacidade do sistema, em conjuntos com outros sistemas, decidir dinamicamente quais componentes executarão uma determinada tarefa (TRAN <i>et al.</i> , 2019; PANETTO <i>et al.</i> , 2019).		Esta capacidade está parcialmente implementada, caso os outros sistemas, máquinas e dispositivos estejam conectados e enviando seus dados e informações em nuvem. Esta capacidade pode ser implementada em sua totalidade a partir da integração dos protocolos de comunicação <i>MTCconnect</i> e <i>OPC-UA</i> no sistema.
Cooperação	Colaboração	Capacidade do sistema e as partes envolvidas compartilharem informações, recursos e responsabilidades para planejar, implementar e avaliar em conjunto o grupo de atividades necessárias para alcançar um objetivo comum (NOF <i>et al.</i> , 2015).		Capacidade implementada apresentada pelo monitoramento de dados e informações do processo e compartilhamento de informações pela plataforma de computação em nuvem aos envolvidos no processo.
Segurança	Segurança	Capacidade dos sistemas em estar protegidos a falhas e ataques nos lados físico e cibernético, devido a sua escalabilidade, complexidade e natureza dinâmica (DENKER <i>et al.</i> , 2012).		Esta capacidade depende da segurança da plataforma de computação em nuvem utilizada. Para a presente proposta, como os dados e informações utilizadas não estariam sendo utilizados para ações operacionais do sistema, ela não teria uma maior criticidade, ao contrário se o sistema interferisse diretamente nos parâmetros de máquinas e equipamentos. Portanto esta capacidade deve ser ainda desenvolvida para minimizar os riscos de ataques cibernéticos.
	Confiabilidade	Capacidade de um sistema em executar as funcionalidades necessárias durante sua operação, sem comprometer de forma significativa seu desempenho e resultado (DENKER <i>et al.</i> , 2012).		Capacidade implementada em relação a coleta dos dados e envio de informações do sistema de forma remota.

QUADRO 12 - DESCRIÇÃO DOS REQUISITOS DE GERENCIAMENTO DE OPERAÇÕES PRESENTES NO CPPS IMPLEMENTADOS NA PROPOSTA

Grupo	Requisito	Definição na literatura	Status	Descrição da aplicação
Reconfigurabilidade	Reconfigurabilidade dinâmica	Capacidade de um sistema alterar sua configuração em caso de falha ou em solicitações internas ou externas. Um sistema altamente reconfigurável deve ser autoconfigurável, ou seja, capaz de ajustar-se dinamicamente e coordenar a operação de seus componentes (SANJAY; ERONU, 2012).		Esta capacidade pode vir a ser implementada com a integração de saídas (digitais e analógicas) do módulo de comunicação, com a integração dos protocolos de comunicação <i>MTConect</i> e <i>OPC-UA</i> .
	Adaptabilidade	Capacidade do sistema em adaptar-se a situações que mudam rapidamente e novos requisitos (como novos produtos ou variantes de produtos) por meio de reconfiguração dinâmica (YUAN; ANUMBA; PARFITT, 2015; OTTO; VOGEL-HEUSER; NIGGEMANN, 2018).		Esta capacidade pode vir a ser implementada com a integração de saídas (digitais e analógicas) no módulo de aquisição e transmissão de dados, integração dos protocolos de comunicação <i>MTConect</i> e <i>OPC-UA</i> , e configuração da plataforma de computação em nuvem para este requisito.
	Escalabilidade	Capacidade de modularidade lógica e física dos componentes do sistema e na padronização das interfaces entre esses módulos (RIBEIRO; HOCHWALLNER, 2018; RIBEIRO; BJORKMAN, 2018).		Capacidade apresentada por meio da possibilidade de fornecer os recursos e funcionalidades desenvolvidos para qualquer empresas do segmento, com a possibilidade ainda da customização de funcionalidades e serviços para as empresas.

Reconfigurabilidade	Conversabilidade	Capacidade presente no sistema em adicionar novas funções, suportadas por sistemas modulares de execução de fabricação capazes de informar sobre o estado atual e suportar melhores decisões (IAROVYI <i>et al.</i> , 2016).		Capacidade apresentada pela integração da plataforma de computação em nuvem para a configuração de funcionalidades por meio do tratamento de dados coletados e apresentados na IHM <i>online</i> e configuração de detecção de eventos, em função da necessidade da empresa.
	Previsibilidade	Capacidade do sistema na previsão do estado de um sistema de forma qualitativa ou quantitativa (HEISS <i>et al.</i> , 2015).		Capacidade destacada pela detecção em tempo real da condição operacional do sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas e da máquina-ferramenta, e da condição de uso do ferramental de corte utilizado.

## 6 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as principais conclusões desta pesquisa, sua principal contribuição, bem como limitações e recomendações para trabalhos futuros.

A Indústria 4.0 caracteriza-se pela busca de vantagens competitivas como o aumento da eficiência operacional e redução dos custos de produção a partir da integração e desenvolvimento de um ambiente de manufatura inteligente no qual os Sistemas de Produção Físicos Cibernéticos (*CPPS*) desempenham papel fundamental. A Máquina-Ferramenta 4.0 destaca-se nesse processo de integração da manufatura, pois apresenta uma extensa integração com sensores, dispositivos, tecnologias de sistemas físicos cibernéticos, internet das coisas e computação em nuvem. Um dispositivo crítico nesse contexto é o sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno, que possibilita a redução do tempo de setup e melhoria da qualidade do processo a partir da medição automática de ferramentas. Apesar desses benefícios, estes sistemas, ainda não estão habilitados a operar em ambientes de produção físico cibernéticos, visto que ainda não dispõem de recursos que permitam sua integração ao *CPPS*, como por exemplo, internet das coisas e uso de computação em nuvem.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um módulo de comunicação para habilitar um sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser a operar no ambiente de produção físico cibernético da Indústria 4.0. Para tanto, foram identificados os requisitos dos *CPPS*, as funcionalidades dos sistemas de pré-ajustagem de ferramentas existentes no mercado e, por fim projetado e construído experimentalmente um módulo de comunicação.

Foram identificados vinte e nove requisitos presentes no ambiente *CPPS*, classificados em relação à integração, inteligência, cooperação, segurança e reconfigurabilidade. Com a inserção de recursos no sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser e as funcionalidades implementadas,

o sistema passou a contemplar vinte e um requisitos, sendo que anteriormente contemplava apenas dois desses requisitos. Os requisitos restantes, e ainda não contemplados, podem vir a ser desenvolvidos e implementados por meio de pesquisas futuras.

O desenvolvimento experimental do módulo de comunicação foi realizado em três estágios, sendo o primeiro para a definição do modelo no qual identificam-se as funcionalidades a serem incorporadas no sistema, bem como a definição dos recursos necessários ao módulo de comunicação. O segundo estágio baseia-se na construção do protótipo, a partir da implementação das funcionalidades e projeto e construção do módulo de comunicação, e o terceiro estágio refere-se à aplicação do protótipo desenvolvido em um banco de ensaios e nele demonstra-se a sua aplicabilidade.

A validação da proposta se deu a partir da montagem de um banco de ensaios, implementação da plataforma de computação em nuvem e aplicação da sincronização de eventos (notificações). A aplicação do módulo de comunicação desenvolvido na pesquisa se mostrou adequada uma vez que permitiu a implementação das funcionalidades de diagnóstico remoto, IHM online, serviços online e monitoramento de indicadores produtivos de máquinas-ferramenta CNC. A inserção de recursos atendeu às necessidades de coleta de dados provenientes do sistema de pré-ajustagem, dos sensores e da máquina-ferramenta CNC, bem como sua transmissão via Internet, e análise na plataforma de computação em nuvem.

As limitações e possíveis melhorias para a presente aplicação, relacionadas em incorporar outros recursos, é a possibilidade da integração de outros protocolos de comunicação de dados, como o *MTCConnect* e *OPC-UA*, possibilitando o envio e recebimento de dados de outros sistemas no chão de fábrica. Em relação as melhorias relacionadas à implementação de novas funcionalidades, destaca-se o uso de algoritmos de aprendizado de máquina que possibilite identificar padrões operacionais e gerar novos eventos e configurações para o processo.

Estas melhorias também estão alinhadas às demandas e necessidades dos ambientes *CPPS* da Indústria 4.0.

Esta pesquisa contribui para o avanço da teoria sobre os *CPPS*, pois a partir do seu desenvolvimento foram identificados os requisitos que estão presentes nesse ambiente, e quais recursos e funcionalidades podem vir a ser utilizados para o desenvolvimento de novos sistemas e dispositivos a fim de habilitá-los a operar em ambiente *CPPS* da Indústria 4.0. As implicações práticas se refletem no desenvolvimento tecnológico do módulo de comunicação em si que permite habilitar tanto um sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas quanto outros dispositivos a operar em ambiente *CPPS* da Indústria 4.0.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Considerando que este é um dos primeiros trabalhos que apresentam o desenvolvimento tecnológico de um módulo de comunicação para habilitar um sistema automático de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser a operar em ambiente de produção físico cibernético da Indústria 4.0, existem, a partir dele, oportunidades para trabalhos futuros. Citem-se entre elas:

- Incorporar outros recursos referentes a entradas e saídas de dados no módulo de comunicação, para a inclusão de sensores e dispositivos cujos dados possam ser usados na análise de indicadores produtivos adicionais do processo;
- Integrar outros protocolos de comunicação, como o *MTCConnect* e *OPC-UA* para o envio e recebimento de dados de outros sistemas no chão de fábrica;
- Implementar o uso de algoritmos de aprendizado de máquina, que possibilite identificar padrões operacionais e que gerem novos eventos e configurações para o processo produtivo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACATECH. **Cyber-physical systems, driving force for innovation in mobility, health, energy and production.** Acatech position paper, December, 2011

ACATECH. **Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0.** Final report of the Industrie 4.0 Working Group, Acatech, April, 2013.

ACATECH. **Securing the future of German manufacturing industry: recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0** (Final report of the Industrie 4.0 Working Group). Acatech – National Academy of Science and Engineering, Germany, 2015.

ADAMSON, G.; WANG, L.; HOLM, M.; MOORE, P. Cloud manufacturing – a critical review of recent development and future trends. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, 30(4–5), 1–34, 2017

ALBERS, A.; GLADYSZ, B.; PINNER, T.; BUTENKO, V.; STÜRMLINGER, T. **Procedure for defining the system of objectives in the initial phase of an Industry 4.0 project focusing on intelligent quality control systems.** Procedia CIRP, 52, 262–267, 2016.

ALI, S.; BIN QAISAR, S.; SAEED, H.; KHAN, M.F.; NAEEM, M.; ANPALAGAN, A. Network challenges for cyber physical systems with tiny wireless devices: a case study on re-liable pipeline condition monitoring. **Sensors** (Switzerland), 15, 7172–205, 2015.

ALLENHOF, S. **Implementation of an example application facilitating Industrie 4.0.** Gothenburg, Sweden: Automation and Mechatronics Chalmers University of Technology; 2015.

AL-MAEENI, S.S.H.; KUHNHEN, C.; ENGEL, B.; SCHILLER, M. **Smart retrofitting of machine tools in the context of industry 4.0.** Procedia CIRP, 88, 369–374, 2020.

ANDERL, I.R. **Industrie 4.0-Advanced Engineering of Smart Products and Smart Production**. Proc. of 19th International Seminar on High Technology, 2014.

ATLURU, S.; HUANG, S.H.; SNYDER, J.P. A smart machine supervisory system frame- work. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 58, 563–572, 2012.

BABICEANU, R.F.; SEKER, R. Big Data and virtualization for manufacturing cyber-physical systems: a survey of the current status and future outlook. **Computers in Industry**, 81, 128–37, 2016

BAGHERI, B.; YANG, S.; KAO, H.A.; LEE, J. Cyberphysical systems architecture for self-aware machines in industry 4.0 environment. **IFAC PapersOnLine**, 48(3), 1622–1627, 2015

BAHETI, R.; GILL, H. **Cyber-physical systems - The Impact of Control Technology**, IEEE, pp. 161-166, 2011.

BAO, J.; GUO, D.; LI, J.; ZHANG, J. The modelling and operations for the digital twin in the context of manufacturing. **Enterprise Information Systems**, 13, 4, pp. 534– 556, 2019.

BAUER, W.; SCHLUND, S.; MARRENBACH, D.; GANSCHAR, O. **Industry 4.0—Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland**, BITKOM company, 2014.

BAUERNHANSL, T.; HOMPEL, M.; VOGEL-HEUSER, B. **Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien und Migration**, 2014.

BECHER, C. **Advances in Production Technology**. Springer, Cham, Switzerland, pp. 11-20, 2015

BERGER, C.; HEES, A.; BRAUNREUTHER, S.; REINHART, G. **Characterization of cyber-physical sensor systems**. *Procedia CIRP*, 41, 638–643, 2016.

BERGER, C.; NÄGELE, J.; DRESCHER, B.; REINHART, G.: **Application of CPS in machine tools**. *Industrial Internet of Things*. Springer Series in Wireless Technology. Springer, Cham, 2017.

BETTENHAUSEN, K.; KOWALEWSKI, S. **Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation**. VDI/VDE-Gesellschaft Mess-und Automatisierungstechnik; 2013.

BIRAL, A.; CENTENARO, M.; ZANELLA, A.; VANGELISTA, L.; ZORZI, M. The challenges of M2M massive access in wireless cellular networks. **Digital Communications and Networks**, 1(1), 1–19, 2015.

BLUM. **Z Nano**, 2020a. Disponível em: [https://www.blum-novotest.com/fileadmin/benutzerdaten/blumnovotest.de/pdf/downloads/messkomponenten/z-taster/z-nano/z-nano-pt\\_01.pdf](https://www.blum-novotest.com/fileadmin/benutzerdaten/blumnovotest.de/pdf/downloads/messkomponenten/z-taster/z-nano/z-nano-pt_01.pdf). Acesso em 20 de out de 2020.

BLUM **Z-pico**, 2020b. Disponível em: <https://www.blum-novotest.com/fileadmin/benutzerdaten/blum-novotest-de/pdf/downloads/messkomponenten/z-taster/z-pico/z-pico-pt.pdf>. Acesso em 20 de out de 2020.

BLUM. **ZX-Speed**, 2020c. Disponível em [https://www.blum-novotest.com/fileadmin/benutzerdaten/blum-novotest-de/pdf/downloads/messkomponenten/z-taster/zx-speed-rc/zx-speed-rc-en\\_01.pdf](https://www.blum-novotest.com/fileadmin/benutzerdaten/blum-novotest-de/pdf/downloads/messkomponenten/z-taster/zx-speed-rc/zx-speed-rc-en_01.pdf). Acesso em 20 de out de 2020.

BLUM. **TC-53-20**, 2020d. Disponível em: <https://www.blum-novotest.com/fileadmin/benutzerdaten/blum-novotest-de/pdf/downloads/messkomponenten/z-taster/tc53-20/tc53-20-en.pdf>. Acesso em 20 de out de 2020.

BLUM. **TC-63-20**, 2020e. Disponível em: [https://www.blum-novotest.com/fileadmin/benutzerdaten/blum-novotest-de/pdf/downloads/messkomponenten/z-taster/tc63-20/tc63-20-de\\_01.pdf](https://www.blum-novotest.com/fileadmin/benutzerdaten/blum-novotest-de/pdf/downloads/messkomponenten/z-taster/tc63-20/tc63-20-de_01.pdf).

Acesso em 20 de out de 2020.

BLUM. **Lasercontrol-digilog**, 2020f. Disponível em: <https://www.blum-novotest.com/fileadmin/benutzerdaten/blum-novotest-de/pdf/downloads/messkomponenten/lasercontrol/LC50-DIGILOG/lasercontrol-bro-en.pdf>. Acesso em 20 de out de 2020.

BLUM. **Micro Single NT**, 2020g. Disponível em: <https://www.blum-novotest.com/fileadmin/benutzerdaten/blum-novotest-e/pdf/downloads/messkomponenten/lasercontrol/micro-single-nt/micro-single-nt-en.pdf> . Acesso em 20 de out de 2020.

BLUM. **Micro Compact NT**, 2020h. Disponível em: <https://www.blum-novotest.com/fileadmin/benutzerdaten/blum-novotest-de/pdf/downloads/messkomponenten/lasercontrol/micro-compact-nt/micro-compact-nt-de.pdf>. Acesso em 20 de out de 2020.

BOCHMANN, L.; GEHRKE, L.; BOCKENKAMP, A.; WEICHERT, F.; ALBERSMANN, R.; PRASSE, C.; MERTENS, C.; MOTTA, M.; WEGENER, K. Towards Decentralized Production: A Novel Method to Identify Flexibility Potentials in Production Sequences Based on Flexibility Graphs. **International Journal Automation Technology**, Vol.9, No.3, pp. 270–282, 2015.

BRETTEL M.; FRIEDERICHSEN N.; KELLER M.; ROSENBERG M. How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: an industry 4.0 perspective. **International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering**, 8:37–44, 2014.

BRYMAN, A. **Research methods and organizational studies**. London: Unwin Hyman, 1989.

CAGGIANO, A. Cloud-based manufacturing process monitoring for smart diagnosis services. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, 31, 612–23, 2018.

CAMARINHA-MATOS L.M.; GOES J.; GOMES L.; MARTINS J. **Contributing to the Internet of Things**. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 394. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.

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

CARDENAS, A. A.; AMIN, S.; SASTRY, S. **Secure control: Towards survivable cyber-physical systems**. Proceedings of the First International Workshop on Cyber-Physical Systems, June, 2008.

CARDENAS, A.; AMIN, S.; SINOPOLI, B.; GIANI, A.; PERRIG, A.; SASTRY, S. **Challenges for securing cyber physical systems**. In: Workshop on Future Directions in Cyber-Physical Systems Security. DHS, 2009.

CARDIN, O. Classification of cyber-physical production systems applications: proposition of an analysis framework. **Computers in Industry**, 104, pp. 11-21, 2019.

CHEN, D.; DOUMEINGTS, G.; VERNADAT, F. Architectures for enterprise integration and interoperability: past, present and future. **Computers in Industry**, 59, (7), 647–659, 2008.

CHEN, Z.; XING, M. **Upgrading of textile manufacturing based on Industry 4.0**, 5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering, Atlantis Press, 2015.

CHEN, J.Y.; LIN, Y.L.; LIN, C.C.; LEE, B.Y. **Development of inspection system for tool presetter**. 59th ILMENAU SCIENTIFIC COLLOQUIUM, Technische Universität Ilmenau, 2017.

CHEN, T.; TSAI, H.R. Ubiquitous manufacturing: current practices, challenges, and opportunities. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, 45, 126–32, 2017.

CHEN, B.; WAN, J.; SHU, L.; LI, P.; MUKHERJEE, M.; YIN, B. **Smart factory of industry 4.0: key technologies, application case, and challenges**. *IEEE* ,6, 6505–19, 2018.

CHENG, G.J.; LIU, L.T.; QIANG, X.J.; LIU, Y. **Industry 4.0 development and application of intelligent manufacturing**. Proceedings - 2016 International Conference on Information System and Artificial Intelligence, 407–10. 2016.

CHENG, Y.; YU, H.; YU, Z.; XU, J.; ZHANG, X. **Imaging Analysis of Micro-milling Tool in the Process of Tool Setting Based on Digital Holography**. *IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO)*, 2019.

CIMINO, C.; NEGRI, E.; FUMAGALLI, L. Computers in Industry Review of digital twin applications in manufacturing. **Computers in Industry**, 113, 1–13, 2019.

CONTI, M.; DAS, S.K.; BISDIKIAN,C.; KUMAR, M.; NI, L. M.; PASSARELLA,A.; ROUSSOS,G. ; TROSTER,G. ; TSUDIK, G.; ZAMBONELLI,F. Looking ahead in pervasive computing: challenges and opportunities in the era of cyber-physical convergence, **Pervasive and Mobile Computing**, 8, 2–21, 2012.

CORDEIRO, A.M.; OLIVEIRA, G.M.; RENTERÍA, J.M.; GUIMARÃES, C.A. Revisão sistemática: uma revisão narrativa. **Rev Col Bras Cir**, 34, 428-431, 2007.

CORRER, I.; VIEIRA JUNIOR, M.; SILVA, J.M.A.; SILVA, D.S.; COSTA, A.L. **Statement of losses caused by the presetting of tools by the manual method**. In: POMS 22nd Annual Conference Annals, Reno, NV, 1-15, 2011.

COSTA, F.S.; VIEIRA JUNIOR, M.; CORRER, I. Produtividade e redução de perdas com uso de toolsetter a laser. **Máquinas e Metais**, v. 51, n. 594, p. 52-61, jul. 2015.

CYPROS Cyber Physische Produktionssysteme. **CyProS—Cyber-Physische Produktionssysteme**. 2013. Disponível em: <http://www.projekt-cypros.de/>. Acesso em: 11 jan 2020.

DE SILVA, P.; DE SILVA, P. **Ipanera: An Industry 4.0 Based Architecture for Distributed Soil-less Food Production Systems**. Proceedings of the 1st Manufacturing and Industrial Engineering Symposium, Colombo, Sri Lanka, 2016.

DENG, C.Y.; GUO, R.F.; XU, X.; ZHONG, R.Y.; YIN, Z.Y. A new high-performance open CNC system and its energy-aware scheduling algorithm. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, (93), 1513-1525, 2017.

DENG, C.; GUO, R.; LIU, C.; ZHONG, R.Y.; XU, X. Data cleansing for energy-saving: a case of cyber-physical machine tools health monitoring system. **International Journal of Production Research**, vol. 56, no. 1–2, pp. 1000–1015, Jan. 2018a.

DENG, C.; GUO, R.; ZHENG, P.; LIU, C.; XU, X.; ZHONG, R.Y. **From Open CNC Systems to Cyber-Physical Machine Tools: A Case Study**. Procedia CIRP, 72, 1270-1276, 2018b.

DENKER, G.; DUTT, N.; MEHROTRA, S.; STEHR, M.O.; TALCOTT, C.; VENKATASUBRAMANIAN, N. Resilient dependable cyber-physical systems: a middleware perspective. **Journal of Internet Services and Applications**, 3, (1), pp. 41-49, 2012.

DERLER, P.; LEE, E.A.; VINCENELLI, A.S. **Modeling cyber-physical systems**, Proc. IEEE, vol. 100, no. 1, pp. 13-28, Jan. 2012.

DUMITRESCU, R.; JUERGENHAKE, C.; GAUSEMEIER, J. **Intelligent Technical Systems OstWestfalenLippe**. 1st Joint International Symposium on System-Integrated Intelligence. New Challenges for Product and Production Engineering; pp. 24-27, 2012:

DWORSCHAK, B.; ZAISER, H. **Competences for cyber-physical systems in manufacturing – first findings and scenarios**. Procedia CIRP 25, 345–350, 2014.

ECKERT, C. **Cyber-Sicherheit in Industrie 4.0, Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle**, Prozesse, Technik, 111, 2017.

EMMANOUILIDIS, C.; PISTOFIDIS, P.; BERTONCELJ, L.; KATSOUROS, V.; FOURNARIS, A.; KOULAMAS, C. Enabling the human in the loop: linked data and knowledge in Industrial cyber-physical systems. **Annual Reviews in Control**, 47, 249–65, 2019.

ENGEL, G.; GREINER, T.; SEIFERT, . **Ontology-assisted engineering of cyber-physical production systems in the field of process technology**. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018.

ETXEBERRIA-AGIRIANO, I.C.I.; NOGUERO, A.; ZULUETA, E. **Configurable cooperative middleware for the next generation of CPS**. 9th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation, 2012.

EVANGELISTA, G. M.S; VIEIRA JUNIOR, M.; SIMON, A.T.; CORRER, I. Impacts of tool preset operation on the efficiency of the machining process. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas** , v. 14, p. 283-299, 2019.

FACCHINETTI, T.; DELLA VEDOVA, M.L. **Real-time modeling for direct load control in cyber-physical power systems**. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 7, 689–98, 2011.

FALLAH, S.M.; TRAUTNER T.; PAUKER, F. **Integrated tool lifecycle**, Procedia CIRP, 79, 257-262, 2019.

FERNANDO, N.; LOKE, S.W.S.W.; RAHAYU, W.; NIROSHINIE, F.; SENG, W.L.; RAHAYU, W. Mobile cloud computing: A survey. **Future Generation Computer Systems**, 29, 84–106, 2013.

FERRER, B.R.; IAROVYI, S.; MOHAMMED, W.M.; LOBOV, A.; LASTRA, J.L.M. Exemplifying the potentials of web standards for automation control in manufacturing systems. **International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology**, 17, 1–12, 2016.

FETTERMANN, D.C.; CAVALCANTE, C.G.S.; ALMEIDA, T.D.; TORTORELLA, G.L. How does Industry 4.0 contribute to operations management? **Journal of Industrial and Production Engineering**, 35, 255–68, 2018.

FLICK, U. **Introducing Research Methodology: A Beginner's Guide to Doing a Research Project**. London: Sage, 2011.

FRANCALANZA, E.; BORG, J.; CONSTANTINESCU, C. A knowledge-based tool for designing cyber physical production systems. **Computer Industry**, vol. 84, pp. 39–58, Jan. 2017.

GALAMBOS, P.; CSAPÓ, Á.; ZENTAY, P.; FÜLÖP, I.M.; HAIDEGGER, T.; BARANYI, P.; RUDAS, I.J. Design, programming and orchestration of heterogeneous manufacturing systems through powered remote collaboration. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 33, 68–77, 2015.

GAMBOA QUINTANILLA, F.; CARDIN, O.; L'ANTON, O.; CASTAGNA, P. **Implementation framework for cloud-based holonic control of cyber-physical production systems**, 14th International Conference Industrial informatics, 2016.

GARCÍA-VALLS, M.; CALVA-URREGO, C.; DE LA PUENTE, J.A.; ALONSO A. Adjusting middleware knobs to assess scalability limits of distributed cyber-physical systems. **Computer Standards and Interfaces**, 51, :95–103, 2017.

GEISBERGER, E.; BROY, M. Agenda CPS. **Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems (Acatech STUDIE)**, Heidelberg *et al.*: Springer Verlag, to be published in 2012.

GEOTECNO. **TSG-130**. 2020. Disponível em: <http://geotecno.com.br/produto-2/>. Acesso em 20 de out de 2020.

GHOBAKHLOO, M. The future of manufacturing industry: a strategic roadmap. **Journal of Manufacturing Technology Management**, 29, 910–36, 2018.

GIL, A.C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GIL, A.C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6 ed. São Paulo: Atlas 2010.

GONZALEZ, G. R.; ORGANERO, M. M.; KLOOS, C. D. **Early infrastructure of an internet of things in spaces for learning**. Proc. 8th IEEE Int. Conference Advanced Learning Technologies, Santander, Cantabria, pp. 381–383, 2008.

GORECKY, D.; LOSKYLL, M. **Mensch-Maschine-Interaktion im Industrie 4.0-Zeitalter**, Springer Berlin Heidelberg, p. 525, 2014.

GRAHAM, S.; BALIGA, G.; KUMAR, P.R. **Abstractions, Architecture, Mechanism, and Middleware for Networked Control**. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 54, no. 7, pp. 1490-1503, July 2009.

GRÄßLER, I.; PÖHLER, A. **Intelligent devices in a decentralized production system concept**. In: Proceedings of 11th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Ischia, July 19 - 21, 2017.

GRIFFIOEN, P.; WEERAKKODY, S.; SINOPOLI, B.; OZEL, O.; MO, Y. **A Tutorial on Detecting Security Attacks on Cyber-Physical Systems**. 18th European Control Conference (ECC), Naples, Italy, pp. 979-984, 2019.

GRUNDSTEIN, S.; FREITAG, M.; SCHOLZ-REITER, B. A new method for autonomous control of complex job shops – Integrating order release,

sequencing and capacity control to meet due dates. **Journal of Manufacturing Systems**, vol. 42, pp. 11–28, Jan. 2017.

GTAI (Germany Trade & Invest). **Industries 4.0-Smart Manufacturing for the Future**. Berlin: GTAI, 2014.

GUNES, V.; PETER, S.; GIVARGIS, T.; VAHID, F. A survey on concepts applications challenges in cyber-physical systems. **KSII Transactions on Internet and Information Systems**, 2015.

GUZMAN, N.H.C.; LUNDTEIGEN, M.A.; WIED, M.; KOZINE, I. Conceptualizing the key features of cyber-physical systems in a multi-layered representation for safety and security analysis. **Systems Engineering**, 1–22., 2019.

HAO, Y.; HELO, P. The role of wearable devices in meeting the needs of cloud manufacturing: A case study. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 45, 168–179, 2017.

HE, J.F. Cyber-physical systems. **Commun. China Comput. Feder**, vol. 6, no. 1, pp. 25–29, 2010.

HEIDENHAIN. **TT-160**, 2020a. Disponível em: [https://www.heidenhain.com/en\\_US/products/touch-probes/tool-measurement/tt-160tt-460/](https://www.heidenhain.com/en_US/products/touch-probes/tool-measurement/tt-160tt-460/). Acesso em: 20 de out de 2020.

HEIDENHAIN, **TT-460**. 2020b. Disponível em: [https://www.heidenhain.com/en\\_US/products/touch-probes/tool-measurement/tt-160tt-460/](https://www.heidenhain.com/en_US/products/touch-probes/tool-measurement/tt-160tt-460/). Acesso em: 20 de out de 2020.

HEISS, M.; OERTL, A.; STURM, M.; PALENSKY, P.; VIELGUTH, S.; NADLER, F. **Platforms for Industrial cyber-physical systems integration: contradicting requirements as drivers for innovation**. Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems, MSCPES 2015 - Held as Part of CPS Week, 2015.

HEXAGON. **TS35.20**. 2020a. Disponível em: <https://www.hexagonmi.com/pt-BR/products/machine-tool-probes/tool-setters/mamph-tool-setter-ts3520>.

Acesso em: 20 de out de 2020.

HEXAGON. **TS35.30**. 2020b. Disponível em: <https://www.hexagonmi.com/pt-BR/products/machine-tool-probes/tool-setters/mamph-tool-setter-ts3530>.

Acesso em: 20 de out de 2020.

HEXAGON. **IR35.70**. 2020c. Disponível em: <https://www.hexagonmi.com/pt-BR/products/machine-tool-probes/tool-setters/mamph-infrared-tool-setter-irt3570>.

Acesso em: 20 de out de 2020.

HEXAGON. **RWT35.40**. 2020d. Disponível em: <https://www.hexagonmi.com/pt-BR/products/machine-tool-probes/tool-setters/mamph-radiowave-tool-setter-rwt3550>.

Acesso em: 20 de out de 2020.

HEXAGON. **LTS35.66**. 2020e. Disponível em: <https://www.hexagonmi.com/pt-BR/products/machine-tool-probes/laser-tool-setters/mamph-laser-tool-setter-lts3566>.

Acesso em: 20 de out de 2020.

HEXAGON. **LTS35.65**. 2020f. Disponível em: <https://www.hexagonmi.com/pt-BR/products/machine-tool-probes/laser-tool-setters/mamph-laser-tool-setter-lts3565>.

Acesso em: 20 de out de 2020.

HEXAGON. **LTS35.65-23**. 2020g. Disponível em: <https://www.hexagonmi.com/pt-BR/products/machine-tool-probes/laser-tool-setters/mamph-laser-tool-setter-lts356523>.

Acesso em 20 de out de 2020.

HEXAGON. **LTS35.60**. 2020h. Disponível em: <https://www.hexagonmi.com/pt-BR/products/machine-tool-probes/laser-tool-setters/mamph-laser-tool-setter-lts3560>.

Acesso em: 20 de out de 2020.

HOFMANN, E.; RÜSCH, M. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. **Computer Industry**, 89, 23–34, 2017.

HOU, B.; ZHANG, C.; YANG, S. Computer Vision Tool-Setting System of Numerical Control Machine Tool. **Sensors**, 20, 5302, 2020.

HUANG, B. X. **Cyber Physical Systems: A survey**. Presentation Report, Jun 2008.

HWANG, J.S. The fourth Industrial revolution (Industry 4.0): Intelligent Manufacturing. **SMT Magazine**, 3, 616–30, 2016.

IAROVYI, S.; MOHAMMED, W.M.; LOBOV, A.; FERRER, B.R.; LASTRA, J.L.M. **Cyber-physical systems for Open-knowledge-driven manufacturing execution systems**. Proceedings of 5th International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies, 1142–54, 2016.

ILSEN, R.; MEISSNER, H.; AURICH, J.C. Optimizing energy consumption in a decentralized manufacturing system. **Journal of Computing and Information Science in Engineering**, 17, 210061–7, 2017.

IEC - International Electrotechnical Commission, 62541. **OPC Unified Architecture Specification -Part 1: Overview and Concepts**. Standard IEC 2015.

ISAKSSON, A.J.; HARJUNKOSKI, I.; SAND, G. The impact of digitalization on the future of control and operations. **Computers and Chemical Engineering** 114, 122–9, 2018.

IVANOV, D.; SOKOLOV, B.; IVANOVA, M. Schedule coordination in cyber-physical supply networks industry 4.0. **IFAC-PapersOnLine**, 49, 839–44, 2016.

JAKOVLJEVIC, Z.; VIDOSAV, M.; STOJADINOVIC, S. **Cyber-physical manufacturing systems (CPMS)**. Proceedings - 5th International Conference on Advanced Manufacturing .Engineering and Technologies, 199–214, 2017.

JAZDI, N. **Cyber physical systems in the context of Industry 4.0.** In IEEE International Conference on Quality and Testing, Robotics, Automation, 1–4, 2014.

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.

JI, Z.; YANHONG, Z.; BAICUN, W.; JIYUAN, Z. Human-cyber-physical systems (HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing. **Engineering**, 5, 624–36, 2019.

JUNG, C.F.; CATEN, C.S.T.; RIBEIRO, J.L.D. A Method of R&D Electronic Product for Application by Independent Engineers, Designers and Inventors. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, 7, 153-173, 2010.

KAGERMANN, H.; LUKAS, W.; WAHLSTER, W. Industry 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. Industriellen Revolution. **VDI Nachrichten**, 13, 1090–1100, 2011.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELD, J. Bericht der Promotorengruppe Kommunikation. Im Fokus: Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. **Handlungsempfehlungen zur Umsetzung Forschungsunion**, 2012

KAGERMANN, H.; HELBIG, J.; HELLINGER, A.; WAHLSTER, W. **Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0:** Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern; Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Forschungsunion; Geschäftsstelle der Plattform Industrie 4.0, Berlin, Frankfurt/Main, 2013.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. Securing the Future of German Manufacturing Industry: Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0. **Acatech**, 13-78, 2013.

KHAJORNRUNGRUANG, P.; SUZUKI, K.; INOUE, T. Study on Non-Contact Tool Tip Nano-Position Detection by Means of Evanescent Field Penetration. **Material Science**, 2018.

KHALID, A.; KIRISCI, P.; KHAN, Z. H.; GHRAIRI, Z.; THOBEN, K.-D.; PANNEK J. Security framework for Industrial collaborative robotic cyber-physical systems. **Computer Industry**, 97, 132–145, 2018.

KIM, K.D.; KUMAR, P. **Cyber-physical systems: A perspective at the centennial**. Proc. IEEE, 100, 13, 1287-1308, 2012.

KIM, J. A Review of Cyber-physical System Research Relevant to the Emerging IT Trends: Industry 4.0, IoT, Big Data, and Cloud Computing. **Journal of Industrial Integration and Management**, 2, 3, 2017.

KLOCKE, F.; KRATZ, S.; AUERBACH, T.; GIERLINGS,S.; WIRTZ, G.; VESELOVAC, D. Process Monitoring and Control of Machining Operations. **International Journal Automation Technology**, 5, 3, 403-411, 2011.

KOENIG, B. Presetters Provide Head Start on Industry 4.0. **Manufacturing Engineering Magazine**, 21, 2017a.

KOENIG, B. Getting Connected. **Manufacturing Engineering Magazine**, 11, 2017b

KRITZINGER, W.; KARNER, M.;TRAAR, G.; HENJES, J.; SIHN, W. Digital Twin in in manufacturing: a categorical literature review and classification. **IFAC-PapersOnLine**, 51, 1016–22, 2018.

KRUEGER, B.V.; CHAZOULE, A.; CROSBY, M.; LASNIER, A.; PEDERSEN, M,R. **A vertical and cyber–physical integration of cognitive robots in manufacturing**. Proc IEEE, 104, 1114–27, 2016.

KULVATUNYOU, B.; IVEZIC, N.; MORRIS, K.C.; FRECHETTE, S. Drilling down on Smart Manufacturing enabling composable apps. **Manufacturing Letters**, 10, 14–7, 2016.

KULVATUNYOU, B.; IVEZIC, N.; SRINIVASAN, V. On architecting and composing engineering information services to enable smart manufacturing. **Journal of Computing and Information Science in Engineering**, 16, 1–31, 2016.

KUMAR, R. **Research methodology – a step-by-step guide for beginners**. 3.ed. London: Sage, 2011.

KUNIO, T. NEC cloud computing system. **NEC Technical Journal**, 5, 10–15, 2010.

KUSIAK, A. Smart manufacturing. **International Journal of Production Research**, 56, 508–517, 2017.

LANZA, G.; STRICKER, N.; MOSER, R. **Concept of an intelligent production control for global manufacturing in dynamic environments based on rescheduling**. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 315–9, 2013.

LASI, H.; FETTKE, P.; KEMPER, G.; FELD, T.; HOFFMANN, M. Industry 4.0: Bedarfsog und Technologiedruck als Treiber der vierten Industrillen Revolution. **The International Journal of Wirtschaftsinformatik**, 56, 261–264, 2014.

LEE, E.A., **Cyber Physical Systems: Design Challenges**. 11th IEEE International Symposium on. IEEE Computer Society, Los Alamitos, Californian, 363-369, 2008.

LEE, E. **CPS Foundations** in Proc. of 47th IEEE/ACM Design Automation Conference,737-742, 2010.

LEE, E.A.; SESHIA, S.A. **Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach**, 1st Edition, 2011.

LEE, E.A.; SESHIA, S.A. **Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach**, Berkey, USA, 2015.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H.A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, 3, 18–23, 2015.

LEE, J.H.; DO NOH, S.; KIM, H.J.; KANG, Y.S. Implementation of cyber-physical production systems for quality prediction and operation control in metal casting. **Sensors**, 18, 1428–44, 2018.

LEITAO, P.; BARBOSA, J.; PAPADOPOULOU, M.E.C.; VENIERIS, I.S. **Standardization in cyber- physical systems: the ARUM case**. Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, 2988–93, 2015

LEVY, Y.; ELLIS, T. A Systems Approach to Conduct an Effective Literature Review in Support of Information Systems Research. **Informing Science JOURNAL**, 181-212, 2006.

LIAO, Y.; DESCHAMPS, F.; LOURES, E.; RAMOS, L. Past, Present and Future of Industry 4.0 – A Systematic Literature Review and Research Agenda Proposal. **International Journal of Production Research**, 55, 3609–3629, 2017.

LIN, K.J.; PANAHI, M. **A real-time service-oriented framework to support sustainable cyber-physical systems**. IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN) 15–21, 2010.

LINS, R.G.; RICARDO, P.; ARAUJO, M.; CORAZZIM, M. In-process machine vision monitoring of tool wear for Cyber-Physical Production Systems. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, 61, 1–17, 2020.

LIU, Y. Application and Study of CNC Network System Based on DNC. **Advanced Materials Research**, 655, 1214-1217, 2013.

LIU, C.; XU, X. **Cyber-physical machine tool - the era of machine tool 4.0**. *Procedia CIRP*, 63, 70–5, 2017.

LIU, X.; ZHU, W. Development of a fiber optical occlusion based non-contact automatic tool setter for a micro-milling machine. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 43, 12–17, 2017.

LIU, C.; CHEN, F.; ZHU, J.; ZHANG, Z.; ZHANG, C.; ZHAO, C.; WANG, T. **Characteristic, Architecture, Technology, and Design Methodology of Cyber-Physical Systems**. In *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, NA (Ed.). Springer International Publishing, 230-246, 2017a.

LIU, C.; CAO, S.; TSE, W.; XU, X. Augmented reality-assisted intelligent window for cyber-physical machine tools. **Journal of Manufacturing Systems**, 44, 280–286, 2017b.

LIU, Y.; PENG, Y.; WANG, B.; YAO, S.; LIU, Z. Review on cyber-physical systems. **IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica**, 4, 1, 27-40, 2017c

LIU, X.F.; SHAHRIAR, M.R.; AL SUNNY, S.M.N.; LEU, M.C; HU, L. Cyber-physical manufacturing cloud: architecture, virtualization, communication, and testbed. **Journal of Manufacturing Systems**, 43, 352–364, 2017d.

LIU, X.; LI, Y. Feature-based adaptive machining for complex freeform surfaces under cloud environment. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 56, 254–263, 2019.

LIU, W.; KONG, C.; NIU, Q.; JIANG, J.; ZHOU, X. A method of NC machine tools intelligent monitoring system in smart factories. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 61, 101842, 2020.

LORINCZ, J. Presetting technology maxes out production. **Manufacturing Engineering**, 157, 61–67, 2016.

LU, Y.; XU, X.; XU, J. Development of a hybrid manufacturing cloud. **Journal of Manufacturing Systems**, 33(4), 551–566, 2014.

LU, Y. Cyber Physical System (CPS)-based Industry 4.0: A Survey. **Journal of Industrial Integration and Management**, 2, 3, 2017.

LU, Y.; XU, X. Cloud-based manufacturing equipment and big data analytics to enable on-demand manufacturing services. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 57, 92–102, 2019.

MAHNKE, W.; LEITNER, S.H.; DAMM, M. **OPC unified architecture**. Springer Science & Business Media, 2009.

MARCONI, M.A.; LAKATOS, E.M. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo, Atlas, 2010.

MARPOSS. **TS30, TS30 90°, VOTS, VOTS 90°, WRTS**. 2020a. Disponível em: <https://www.marposs.com/media/3143/d-1/t-file/D6C03500G0.pdf>. Acesso em: 20 de out de 2020.

MARPOSS. **VTS SU**. 2020b. Disponível em: <https://www.marposs.com/media/5110/d-1/t-file/D6C08800G0.pdf>. Acesso em: 20 de out de 2020.

MARPOSS. **MIDA LASER**. 2020c. Disponível em: <https://www.marposs.com/media/3684/d-1/t-file/D6C04800G0.pdf>. Acesso em: 20 de out de 2020.

MARWEDEL, P. **Embedded Systems Design - Embedded Systems Foundations of Cyber- Physical Systems**. Springer, Heidelberg, 2010.

MARWEDEL, P.; ENGEL, M. **Efficient computing in cyber-physical systems**. International Conference on Embedded Computer Systems (SAMOS), 328-332, 2012.

MEISSNER, H.; AURICH, J.C. **Implications of Cyber-Physical Production Systems on Integrated Process Planning and Scheduling**. *Procedia Manufacturing*, 28, 167–173, 2019.

MEKID, S.; PRUSCHEK, P.; HERNANDEZ, J. Beyond intelligent manufacturing: a new generation of flexible intelligent NC machines. **Mechanism and Machine Theory**, 44, 466–476, 2009.

MELL, P.; GRANCE, T. The NIST definition of cloud computing. **NIST Special Publication**, 800, 7, 2011.

METROL. **T24E, T20, T26, TM26, P11, P21**. 2020. Disponível em: [https://www.metrol.co.jp/pt/catalog/download/&\\_ga=2.224922776.304569843.1583608781-211380644.1583608781](https://www.metrol.co.jp/pt/catalog/download/&_ga=2.224922776.304569843.1583608781-211380644.1583608781). Acesso em 20 de out de 2020.

MIGUEL, P.C. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro, Elsevier, 2007.

MLADINEO, M.; CELAR, S.; CELENT, L.; CRNJAC, M. Selecting manufacturing partners in push and pull-type smart collaborative networks. **Advanced Engineering Informatics**, 38, 291–305, 2018.

MOGHADDAM M.; CADAVID, M.N.; KENLEY, C.R.; DESHMUKH, A.V. Reference architectures for smart manufacturing: a critical review. **Journal of Manufacturing Systems**, 49, 215–25, 2018.

MONOSTORI, L. **Cyber-physical production systems: roots, expectations and R&D challenges**. *Procedia CIRP*, 17, 9–13, 2014.

MONOSTORI, L. Chysical production systems: roots from manufacturing science and technology. **Automatisierungstechnik**, 63, 766–76, 2015.

MONOSTORI, L.; KÁDÁR, B.; BAUERNHANSL, T.; KONDOH, S.; KUMARA, S.; REINHART, G.; SAUER, O.; SCHUH, G; SIHN, W; UEDA, K. Cyber-physical

systems in manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 65, 2, 621-641, 2016.

MORA, H.; COLOM, J.F.; GIL, D.; JIMENO-MORENILLA, A. Distributed computational model for shared processing on Cyber-Physical System environments. **Computer Communications**, 111, 68–83, 2017.

MOSTERMAN, P.J.; ZANDER, J. Industry 4.0 as a cyber-physical system study. **Software & Systems Modeling.**, 15, 17–29, 2016.

MOURTZIS, D.; VLACHOU, E. A cloud-based cyber-physical system for adaptive shop- floor scheduling and condition-based maintenance. **Journal of Manufacturing Systems**, 47, 179–98, 2018.

MOURTZIS, D. **Machine Tool 4.0 in the Era of Digital Manufacturing.** Proceedings of the 32nd European Modeling & Simulation Symposium, 416-429, 2020.

NAKANO, D. **Métodos de pesquisa adotados na Engenharia de Produção e gestão de operações.** In: MIGUEL, P.A.C. (Coord.). Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações. 2. ed. São Paulo: Elsevier, 2012.

NAPOLEONE, A.; MACCHI, M.; POZZETTI, A. A review on the characteristics of cyber-physical systems for the future smart factories. **Journal of Manufacturing Systems**, 54, 305-335, 2020.

NAYAK, A.; LEVALLE, R.; LEE, S.; NOF, S. Resource Sharing in Cyber-physical Systems: Modelling Framework and Case Studies. **International Journal of Production Research**, 54, 6969–6983, 2016.

NIGGEMANN, O.; FREY, C. Data-driven anomaly detection in cyber-physical production systems. **Automatisierungstechnik**, 63, 10, 2015.

NOF, S.Y.; CERONI, J.; JEONG, W.; MOGHADDAM, M. **Revolutionizing collaboration through e-Work, e-Business, and e-Service**, 2015.

OCDE - Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico. Manual de Frascati. **Metodologia proposta para definição da pesquisa e desenvolvimento experimental**. Tradução: F-INICIATIVAS P+D+I. Tradutor: Oliver Isnard, 2013.

OCHOA, S.F.; FORTINO, G.; DI FATTA, G. Cyber-physical systems, internet of things and big data. **Future Generation Computer Systems**, 75, 82-84, 2017.

OOI, K.B.; LEE, V.H.; TAN, G.W.H.; HEW, T.S.; HEW, J.J. Cloud computing in manufacturing: The next Industrial revolution in Malaysia? **Expert Systems with Applications**, 93, 376–394, 2018.

OPC Foundation. OPC Unified Architecture - **Interoperabilität für Industrie 4.0 und das Internet der Dinge**. In White paper, 2016

OTTO, J.; VOGEL-HEUSER, B.; NIGGEMANN, O. **Automatic parameter estimation for reusable software components of modular and reconfigurable cyber-physical production systems in the domain of discrete manufacturing**. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 14, 275–82, 2018.

OZTEMEL, E.; GURSEV, S. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 1-56, 2018.

PANETTO, H.; IUNG, B.; IVANOV, D.; WEICHHART, G.; WANG, X. Challenges for the cyber-physical manufacturing enterprises of the future. **Annual Reviews in Control**, 2019.

PARK, K.J. Cyber-physical systems: Milestones and research challenges. **Computer Communications**, 36, 1–7, 2012.

PARLEC, P. **TMM – Precision Tool Measuring Systems**, New York, 2004.

PENAS, O.; PLATEAUX, R.; PATALANO, S.; HAMMADI, M. Multi-scale approach from mechatronic to Cyber-Physical Systems for the design of manufacturing systems. **Computer Industry**, 86, 52–69, 2017.

PEREIRA, A.C.; ROMERO, F. **A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept**. *Procedia Manufacturing*, 13, 1206–14, 2017.

PÉREZ, F.; IRISARRI, E.; ORIVE, D.; MARCOS, M.; ESTEVEZ, E. **A CPPS Architecture approach for Industry 4.0**. *IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*, 1-4, 2015.

PETHIG, F. ET AL. Industrie 4.0 Kommunikation mit OPC UA Leitfaden zur Einführung in den Mittelstand, In **VDMA Guideline**, 32, 2017.

PETRASCH R.; HENTSCHE R. **Process modeling for Industry 4.0 applications**. *13th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering*, 2016.

PIRVU, B.C.; ZAMFIRESCU, C.B.; GORECKY, D. Engineering insights from an anthropocentric cyber-physical system: a case study for an assembly station. **Mechatronics**, 34, 147–59, 2016.

PISCHING, M.A.; JUNQUEIRA, F.; SANTOS FILHO, D.J.; MIYAGI, P.E. **Service composition in the cloud-based manufacturing focused on the industry 4.0**. *Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems*, Springer International Publishingpp, 65–72, 2015.

POSADA, J.; TORO, C.; BARANDIARAN, I.; OYARZUN, D.; STRICKER, D.; DE AMICIS, R. **Visual computing as a key enabling technology for industrie 4.0 and Industrial internet**. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 35, 26–40, 2015.

POST, T.; ILSEN, R.; HAMANN, B.; HAGEN, H.; AURICH, J. C. User-guided visual analysis of cyber-physical production systems. **Journal of Computing and Information Science in Engineering**, 17, 021005, 2017.

PRAUSE, M.; WEIGAND, J. Industry 4.0 and object-oriented development: incremental and architectural change. **Journal of Technology Management and Innovation**, 11, 104–110, 2016.

PUTNIK, G. Advanced manufacturing systems and enterprises: Cloud and ubiquitous manufacturing and an architecture. **Journal of Applied Engineering Science**, 10, 127–134, 2012.

QI, C.; HE, Y. Design of data collection system based on CPS. **Applied Computer Systems**, 19, 5–8, 2010.

QIN, J.; LIU, Y.; GROSVENOR, R. **A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and beyond**. *Procedia CIRP*, 52, 173–178, 2016.

RAJKUMAR, R.; LEE, I.; SHA, L.; STANKOVIC, J. **Cyber-physical systems: The next computing revolution**. Proceedings of the Design Automation Conference, 13-18, 2010.

RAMA, G.; REDDY, K.; SINGH, H.; HARIHARAN, S. Supply chain wide transformation of traditional industry to industry 4.0. **Journal of Engineering and Applied Science**, 11, 11089–97, 2016.

REINHART, G.; WAHLSTER, W.; SCHOLZ-REITER, B.; THOBEN, I.K.D.; ENGELHARDT, P. Cyber-Physische Produktionssysteme: Produktivitäts und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme. **Fabrik. wt Werkstattstechnik online**, 84–89, 2013.

RENISHAW. **NC1**. 2020a. Disponível em: <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-nc1-non-contact-tool-setting-system-accessories--7889>. Acesso em: 20 de out de 2020.

RENISHAW. **NC2**. 2020b. Disponível em: <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-nc2-non-contact-broken-tool-detection-system--5865>. Acesso em: 20 de out de 2020.

RENISHAW. **NC3**. 2020c. Disponível em: <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-nc3-non-contact-tool-setting-system--6327>. Acesso em: 20 de out de 2020.

RENISHAW. **NC4**. 2020d. Disponível em: <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-nc4-non-contact-tool-setting-system--104488>. Acesso em: 20 de out de 2020.

RENISHAW. **OTS**. 2020e. Disponível em: <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-ots--87277>. Acesso em: 20 de out de 2020.

RENISHAW. **OTS ½ AA**. 2020f. Disponível em: <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-ots-1-2-aa--18162>. Acesso em 20 de out de 2020.

RENISHAW. **OTS AA**. 2020g. Disponível em: <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-ots-aa--23177>. Acesso em: 20 de out de 2020.

RENISHAW. **Primo System**. 2020h. Disponível em: <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-primo-system--65252>. Acesso em: 20 de out de 2020.

RENISHAW. **RTS**. 2020i. Disponível em: <https://resources.renishaw.com/pt/details/catalogo-de-produto-rts-preset-de-ferramentas-a-radio--89521>. Acesso em: 20 de out de 2020.

RENISHAW. **TRS1**. 2020j. Disponível em: <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-trs1-non-contact-broken-tool-detection-system--3295>. Acesso em: 20 de out de 2020.

RENISHAW. **TRS2**. 2020k. Disponível em: <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-trs2-non-contact-tool-breakage-detection-system--97290>. Acesso em: 20 de out de 2020.

RENISHAW. **TS27R**. 2020l. Disponível em: <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-ts27r-tool-setting-probe-113192>. Acesso em: 20 de out de 2020.

RENISHAW. **TS34**. 2020m. Disponível em: <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-ts34-tool-setting-probe--26792>. Acesso em: 20 de out de 2020.

RIBEIRO, L. **Cyber-physical production systems design challenges**. IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Edinburgh, United Kingdom, 1189–1194, 2017.

RIBEIRO, L.; BJORKMAN, M. **Transitioning from standard automation solutions to cyber-physical production systems: an assessment of critical conceptual and technical challenges**. IEEE Systems Journal, 12, 3816–27, 2018.

RIBEIRO, L.; HOCHWALLNER, M. On the design complexity of cyberphysical production systems. **Complexity**, 1–13, 2018.

ROBLEK, V.; MEŠKO, M.; KRAPEŽ, A. A Complex View of Industry 4.0. **SAGE Open**, 6, 2016.

ROMERO, D.; BERNUS, P.; NORAN, O.; STAHRÉ, J. **Advances in production management systems. Initiatives for a sustainable world**. Springer International Publishing; 2016.

ROSENBERG, E.; HAEUSLER, M.H.; ARAULLO, R.; GARDNER, N. **Smart architecture-bots and industry 4.0 principles for architecture**. Proceedings of the 33rd Ecaade Conference, 2, 251–9, 2015.

RUDTSCH, V.; GAUSEMEIER, J.; GESING, J.; MITTAG, T.; PETER, S. **Pattern-based business model development for cyber-physical production systems**. Procedia CIRP, 25, 313–319, 2014.

RUNGGER, M.; TABUADA, P. **A notion of robustness for cyber-physical systems.** *IEEE Transactions on Automatic Control*, 61, 2108–2123, 2016.

RUPPERT, T.; JASKÓ, S.; HOLCZINGER, T.; ABONYI, J. Enabling Technologies for Operator 4.0: A Survey. **Applied Sciences**, 8, 1650–68, 2018.

SALDIVAR, A.; LI, Y.; CHEN, W.; ZHAN, Z.; ZHANG, J.; CHE, L. **Industry 4.0 with Cyber-physical Integration: A Design and Manufacturing Perspective.** *Proceedings of 2015 21st International Conference on Automation and Computing*, 2015.

SANDERSON, D.; CHAPLIN, J.C.; RATCHEV, S. Conceptual Framework for Ubiquitous Cyber-Physical Assembly Systems in Airframe Assembly. **IFAC-PapersOnLine**, 51, 417–22, 2018.

SANDOR, H.; GENGE, B.; HALLER, P.; DUKA, A.V.; CRAINICU, B. **Cross-layer anomaly detection in Industrial cyber-physical systems.** *25th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks*, 1–5, 2017.

SANISLAV, T.; MICLEA, L. Cyber-Physical Systems - Concept, Challenges and Research Areas. **Journal of Control Engineering and Applied Informatics**, 14, 28-33, 2012.

SANJAY, M.; EROUNU, E. Implementing Reconfigurable Wireless Sensor Networks: The Embedded Operating System Approach. **Embedded Systems - High Performance Systems, Applications and Projects**, 11, 221-232, 2012.

SAUER, O.; EBEL, M. Plug-and-work von Produktionsanlagen und übergeordneter Software. **INFORMATIK 2007**, 331–338, 2007.

SCHAUPP, E.; ABELE, E.; METTERNICH, J. **Potentials of Digitalization in Tool Management.** *In Procedia CIRP*, 63, 144-149, 2017.

SCHLECHTENDAHL, J.; KEINERT, M.; KRETSCHMER, F.; LECHLER, A.; VERL, A. **Making existing production systems Industry 4.0-ready**. Springer, Berlin Heidelberg. 2015.

SCHLICK, J. **Industry 4.0 in der praktischen Anwendung**. In T. Bauernhansl, M. ten Hompel, & B. Vogel-Heuser (Eds.), *Industry 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, 4, 57–84, 2014.

SHA, L.; GOPALAKRISHNAN, S.; LIU, X.; WANG, Q. **Cyber-physical systems: A new frontier**. *Machine Learning in Cyber Trust*, Springer, 3-13, 2009.

SHAFIQ, S.I.; SANIN, C.; TORO, C.; SZCZERBICKI, E. Virtual engineering object (VEO): toward experience-based design and manufacturing for Industry 4.0, **Cybernetics and Systems**. 46, 35–50, 2015.

SHAFIQ, S.I.; SANIN, C.; SZCZERBICKI, E.; TORO, C. Virtual engineering factory: creating experience base for Industry 4.0. **Cybernetics and Systems**, 47, 32–47, 2016.

SHAO J. Cloud Computing with Heavy CNC Machine Tools. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, 1233. Springer, 2021.

SIHN, W. Industry 4.0: The Future of Production in Europe. **Fraunhofer Austria Research**, 2016.

SILVA, R.F.A.; SILVA, J.B.A.; DINIZ, L.S.; NOBREGA, L.H.M.S.; SILVA, V.N. **Sistema para pré-ajustagem de ferramentas, utilizando processamento de imagens, aplicado a um centro de usinagem CNC**. Principia, João Pessoa, PB, 2017.

SIMON, A.T.; MAESTRELLI, N.C.; AGOSTINHO, O.L. Influência das Técnicas de Pré-ajustagem de Ferramentas na Utilização de Tecnologia NC no Brasil. **Revista Máquinas e Metais**, 434, 210, 2002.

SIMON, A.T.; LIMA, C.R.C. Computer numeric control machine tools utilization by metalworking companies in Brazil. **International Journal of Manufacturing Research**, 10, 3, 2015.

SORTINO, M.; BELFIO, S.; MOTYL, B.; MOTYL, G. Compensation of geometrical errors of CAM/CNC machined parts by means of 3D workpiece model adaptation. **Computer Aided Design**, 48, 28–38, 2014.

STOCK, T.; SELIGER, G. **Opportunities of sustainable manufacturing in Industry 4.0**. Procedia CIRP, 40, 536–541, 2016.

SUNNY, S.M.N.A.L.; LIU X.F.; SHAHRIAR, M.R. Communication method for manufacturing services in a cyber–physical manufacturing cloud. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, 31, 636–52, 2018.

TANG, H.; LI, D.; WANG, S.; DONG, Z. **CASOA: an architecture for agent-based manufacturing system in the context of industry 4.0**. IEEE Access, 6, 12746–54, 2017.

TAO, F.; QI, Q. **New IT driven service-oriented smart manufacturing: framework and characteristics**. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Systems, 49, 81–91, 2019.

TEDESCHI, S.; RODRIGUES, D.; EMMANOUILIDIS, C.; ERKOYUNCU, R.R.; STARR, A. **A cost estimation approach for IoT modular architectures implementation in legacy systems**. Procedia Manufacturing, 19, 103–10, 2018.

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

THAMES, L.; SCHAEFER, D. **Software-defined cloud manufacturing for Industry 4.0**. Procedia CIRP, 52, 12–17, 2016.

THIEDE, S.; JURASCHEK, M.; HERRMANN, C. **Implementing cyber-physical production systems in learning factories**. 6th CIRP Conference on Learning Factories. Procedia CIRP; 7-12, 2016.

THOBEN, K. D.; WIESNER, S.; WUEST, T. Industrie 4.0' and Smart Manufacturing – A Review of Research Issues and Application Examples. **International Journal of Automation Technology**, 11, 4–16, 2017.

TORMACK. **Electronic Tool Setter**. 2020. Disponível em: <https://www.tormach.com/store/index.php?app=ecom&ns=prodshow&ref=31875>. Acesso em: 20 de out de 2020.

TRAN, N.; PARK, H.; NGUYEN, Q.; HOANG, T. Development of a smart cyber-physical manufacturing system in the industry 4.0 context. **Applied Sciences**, 9, 1–26, 2019.

TRAPPEY, A.J.C.; TRAPPEY, C.V.; GOVINDARAJAN, U.H.; SUN, J.J.; CHUANG, A.C. **A review of technology standards and patent portfolios for enabling cyber-physical systems in advanced manufacturing**. IEEE Access,, 4, 7356–82, 2016.

TRAPPEY, A.J.C.; TRAPPEY, C.V.; GOVINDARAJAN, U. H.; CHUANG, A.C.; SUN, J.J. A review of essential standards and patent landscapes for the Internet of Things: a key enabler for Industry 4.0. **Advanced Engineering Informatics**, 33, 208–29, 2017.

TSAI, W.H.; LU, Y.H. A framework of production planning and control with carbon tax under industry 4.0. **Sustainability**, 10, 1–24, 2018.

TU, M.; LIM, M.K.; YANG, M.F. IoT-based production logistics and supply chain system – part 2 IoT-based cyber-physical system: a framework and evaluation. **Industrial Management and Data Systems**, 118, 96–125, 2018.

UPASANI, K.; BAKSHI, M.; PANDHARE, V.; LAD, B.K. Distributed maintenance planning in manufacturing industries. **Computers and Industrial Engineering**, 108:1–14, 2017.

URBINA, M.; ASTARLOA, A.; LAZARO, J.; BIDARTE, U.; VILLALTA, I.; RODRIGUEZ, M. **Cyber-physical production system gateway based on a programmable SoC platform**. *IEEE Access*, 5, 20408–20417, 2017.

VARGHESE, A.; TANDUR, D. **Wireless Requirements and Challenges in Industry 4.0**. In Proceedings of 2014 International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), 634–638, 2014.

VDI/VDE. **Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation**. Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, 2013.

VIEIRA JUNIOR, M.; CARVALHO, R.; PEREIRA, A.; BARDUZZI, J.; CORRER, I.; BATISTTI, E.; FARDIN, E. **Diagnosis of the Use of Automated Systems for Presetting of Tools on CNC Machine Tools**. In: Production and Operations Management Society, Orlando. Anais... Orlando: POMS 27th Annual Conference, 2-6, 2016.

VIEIRA JUNIOR, M.; BAPTISTA, E.A.; ARAKI, L.; SMITH, S.; SCHMITZ, T. The role of tool presetting in milling stability uncertainty. **Procedia Manufacturing**, 26, 164-172, 2018.

VIJAYARAGHAVAN, A.; SOBEL, W.; FOX, A.; DORNFELD, D.; WARNDORF, P. **Improving machine tool interoperability using standardized interface protocols: MTConnect**, in: Proceedings of the International Symposium on Flexible Automation (ISFA), Atlanta, GA, USA., 1–6, 2008.

VOGEL-HEUSER, B.; KEGEL, G.; BENDER, K.; WUCHERER, K. Global Information Architecture for Industrial Automation. **Automatisierungstechnik**, 57, 108–115, 2009.

VUONG, T.P.; LOUKAS, G.; GAN, D. **Performance Evaluation of Cyber-Physical Intrusion Detection on a Robotic Vehicle**. IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing. Liverpool, 2106-2113, 2015.

WAN, K.; HUGHES, D.; MAN, K.L.; KRILAVICIUS, T. **Composition challenges and approaches for cyber physical systems**. In 2010 IEEE International Conference on Networked Embedded Systems for Enterprise Applications (NESEA'10), 1-7, 2010.

WAN, J.; YAN, H.; SUO, H.; LI, F. Advances in cyber-physical systems research. **KSII Transactions on Internet and Information Systems**, 5, 1891–1908, 2011.

WAN, J.; CHEN, M.; XIA, F.; LI, D.; ZHOU, K. From machine-to-machine communications towards cyber-physical systems. **Computer Science and Information Systems**, 10, 1105–1128, 2013.

WANG, G.; NAKAJIMA, H.; YAN, Y.; ZHANG, X.; WANG, L. A methodology of tool lifecycle management and control based on RFID. **Industrial Engineering and Engineering Management**, 1920-1924, 2009.

WANG, L.; TÖRNGREN, M.; ONORI, M. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. **Journal of Manufacturing Systems**, 37, 517–27, 2015.

WANG, K. Intelligent Predictive Maintenance (IPdM) system – industry 4.0 scenario. **WIT Transactions on Engineering Sciences**, 113, 259–68, 2016.

WANG, L.; HAGHIGHI, A. Combined strength of holons, agents and function blocks in cyber-physical systems. **Journal of Manufacturing Systems**, 40, 25-34, 2016.

WANG, G.; ZHIMENG, LI.; DONG, YI. Recent Advances in Intelligent Monitoring of Cutting Tool Condition. **Aeronautical Manufacturing Technology**, 6, 16-23, 2018.

WELLS, L.J.; CAMELIO, J.A.; WILLIAMS, C.B.; WHITE, J. Cyber-physical security challenges in manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, 2, 74-77, 2014.

WEYER, S.; MEYER, T.; OHMER, M.; GORECKY, D.; ZÜHLKE, D. Future modeling and simulation of CPS-based factories: an example from the automotive industry. **IFAC- PapersOnLine**, 49, 97–102, 2016.

WOLFGANG, W. **From Industry 1.0 to Industry 4.0: Towards the 4th Industrial Revolution**. Forum Business meets Research, 2012.

WONG, C.Y.; MCFARLANE, D.; ZAHARUDIN, A. H.; AGARWAL, V. **The intelligent product driven supply chain**. IEEE international conference on systems, man and cybernetics, 6–9, 2002.

WOO, J.; SHIN, S.J.; SEO, W.; MEILANITASARI, P. Developing a big data analytics platform for manufacturing systems: architecture, method, and implementation. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 99, 2193–217, 2018.

WU, F.J.; KAO, Y.F.; TSENG, Y.C. From wireless sensor networks towards cyber physical systems. **Pervasive and Mobile Computing**, 7, 397–413, 2011.

WU, D.; TERPENNY, J.; SCHAEFER, D. Digital design and manufacturing on the cloud: a review of software and services. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing**, 31, 104–18, 2017.

WU, X.; GOEPP, V.; SIADAT, A. **Cyber Physical Production Systems: A Review of Design and Implementation Approaches**. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Macao, 1588-1592, 2019.

XU, X. From cloud computing to cloud manufacturing. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 28, 75–86, 2012.

XU, X. Machine Tool 4.0 for the new era of manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 1-8, 2017:

XU, L.; XU, E.; LI, L. Industry 4.0: State of the art and future trends. **International Journal of Production Research**, 56, 8, 2941-2962, 2018.

YANG, M.S.; KANG, N.K.; KIM, T.H.; JOO, W.K.; PARK, M.W.; CHOI, K.N. An analysis of National R&D Collaborators Network based on the NTIS data. **International Journal of Software Engineering and Its Applications**, 8, 11–24, 2014.

YOON, S.; SUH, S. Manufacturing information bus from from the perspective of cyber physical manufacturing systems (CPMS). **IFAC PapersOnLine**, 49, 103–8, 2016.

YU, Z.; ZHOU, L.; MA, Z.; EL-MELIGY, M.A. **Trustworthiness modeling and analysis of cyber-physical manufacturing systems**. *IEEE Access*, 5, 26076–85, 2017.

YU, S. **A Design of Camera Adjustment Mechanism Based on Automatic Visual NC tool Detector**. International Conference on Precision Machining, Non-Traditional Machining and Intelligent Manufacturing, 2019.

YUAN, X.; ANUMBA, C.J.; PARFITT M.K. Review of the potential for a cyber-physical system approach to temporary structures monitoring. **International Journal of Architectural Research Archnet**, 9, 26–44, 2015.

YUSOF, Y.; LATIF, K.A. Novel ISO 6983 interpreter for open architecture CNC systems. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 80, 1777-1786, 2015.

ZHANG, Y.; ZHANG, G.; QU, T.; LIU, Y.; ZHONG, R.Y. Analytical target cascading for optimal configuration of cloud manufacturing services. **Journal of Cleaner Production**, 151, 330–343, 2017a.

ZHANG, Y.; QIAN, C.; LU, J.; LIU, Y. **Agent and Cyber-Physical System Based Self- Organizing and Self-Adaptive Intelligent Shopfloor**. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 13, 737–47, 2017b.

ZHONG, R.Y.L.H.; WANG; XU, X. **An IoT-enabled Real-time Machine Status Monitoring Approach for Cloud Manufacturing**. Procedia CIRP, 63, 709-714, 2017.

ZHOU, K.; LIU, T.; ZHOU, L. **Industry 4.0: Towards Future Industrial Opportunities and Challenges**. 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2147–2152, 2015.