

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

**PROPOSTA DE UMA ARQUITETURA DE
COMUNICAÇÃO PARA MÁQUINAS-FERRAMENTA NO
CONTEXTO DE *CYBER PHYSICAL PRODUCTION
SYSTEM* (CPPS)**

EDUARDO MARCHESINI

ORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ LUIS HELLENO

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2020

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

**PROPOSTA DE UMA ARQUITETURA DE
COMUNICAÇÃO PARA MÁQUINAS-FERRAMENTA NO
CONTEXTO DE *CYBER PHYSICAL PRODUCTION
SYSTEM (CPPS)***

EDUARDO MARCHESINI

ORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ LUIS HELLENO

Dissertação a ser apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2020

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

M316p Marchesini, Eduardo
Proposta de uma arquitetura de comunicação para máquinas-
ferramenta no contexto de Cyber Physical Production System
(CPPS) / Eduardo Marchesini. – 2020.
76 fls.; il.; 30 cm.

Orientador (a): Prof. Dr. André Luis Helleno.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Metodista de
Piracicaba, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção, Santa Bárbara D'Oeste, 2020.

1. Cyber-Physical Production Systems. 2. Indústria 4.0.
3. Padrão de comunicação. 4. Protocolo de comunicação. I.
Helleno, André Luis. II. Título.

CDD – 670

"Podemos julgar nosso progresso pela coragem de nossas perguntas e pela profundidade de nossas respostas, nossa vontade de abraçar o que é verdadeiro e não o que é bom."

Carl Sagan

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. André Luis Helleno, por toda dedicação, conhecimento, apoio nos momentos mais difíceis e, principalmente, por me convencer que esta jornada seria incrível.

Muitos me ajudaram nessa jornada de forma direta ou indireta, demonstrando paciência e carinho comigo, agradeço cada gesto com muito amor. Porém, desde o primeiro momento, duas pessoas me vieram à mente ao iniciar esta jornada, ou seja, desde sempre este mestrado foi dedicado a eles. Portanto, peço desculpas por restringir a eles os agradecimentos.

À minha mãe (em memória) pois por infortúnio da vida tivemos que dizer adeus. Em meu coração posso sentir sua presença à cada passo. Sei que de alguma forma tudo isso tem muito de você.

Ao meu pai que me tornou o homem que sou. Sempre foi minha bússola moral, basta refletir aquilo que você faria e saberei o caminho correto. Sempre foi meu alicerce, pois todas as vezes que parecia tudo perdido, eu tive você ao meu lado. Pai, você é mais merecedor desse Mestrado que eu, pois sou seu eterno orientando.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

MARCHESINI, Eduardo. **Proposta de uma arquitetura de comunicação para máquinas-ferramenta no contexto de Cyber-Physical Production System (CPPS), 2020.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

RESUMO

A evolução das tecnologias associadas à redução do seu custo de implementação tem contribuído para a revolução no ambiente de manufatura, o que é definido como a quarta revolução industrial. Nesse sentido, tem crescido a inserção de sensores para monitorar e interagir com as unidades de um sistema de manufatura (operadores, máquinas e equipamentos e células de manufatura), assim como, tem crescido o desenvolvimento de sistemas de aquisição e análise de informações para que as tomadas de decisões sejam eficientes. Esse cenário tem gerado inúmeros estudos na busca do desenvolvimento de um cenário *Cyber-Physical Production System (CPPS)* capaz de atender os requisitos da Indústria 4.0. Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma arquitetura de comunicação para integrar máquinas-ferramenta CNC em um cenário de CPPS dentro deste contexto. Para tanto, o método de pesquisa utilizado foi um estudo de caso em uma empresa multinacional fabricante de máquinas-ferramenta, no qual foi desenvolvido uma arquitetura de comunicação para máquinas-ferramenta considerando duas plataformas de CNC, os requisitos de sensores do fabricantes da máquina ferramenta e requisitos de clientes usuários de máquina ferramenta em um contexto de CPPS. A arquitetura desenvolvida foi implementada conforme condições reais de uso e validada conforme os requisitos determinados pela pesquisa, desta forma foi possível encontrar pontos de otimização do sistema aumentando desta forma a viabilidade técnica e financeira da arquitetura teórica proposta.

PALAVRAS-CHAVE: Indústria 4.0, Protocolo de comunicação, Padrão de Comunicação, *Cyber-Physical Production Systems*.

MARCHESINI, Eduardo. **Proposal of a communication architecture for machine tools in the context of Cyber-Physical Production System (CPPS), 2020.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

ABSTRACT

The evolution of technologies associated with the reduction of its cost of implementation has contributed to the revolution in the manufacturing environment, which is defined as the fourth industrial revolution. In this sense, the insertion of sensors to monitor and interact with the units of a manufacturing system (operators, machines and equipment and manufacturing cells) has grown, as well as the development of information acquisition and analysis systems so that decision-making is efficient. This scenario has generated numerous studies in the search for the development of a Cyber-Physical Production System (CPPS) scenario capable of meeting the requirements of Industry 4.0. This work aims to develop a communication architecture to integrate CNC machine tools in a CPPS scenario within this context. Therefore, the research method used was a case study in a multinational machine tool manufacturer, in which a communication architecture for machine tools was developed considering two CNC platforms, the sensor requirements of the machine tool manufacturers and requirements of machine tool customers in a CPPS context. The developed architecture was implemented according to real conditions of use and validated according to the requirements determined by the research, in this way it was possible to find points of optimization of the system thus increasing the technical and financial viability of the proposed theoretical architecture.

KEYWORDS: *Industry 4.0. Communication protocol. Standard Communication. Cyber-Physical Production Systems.*

SUMÁRIO

RESUMO	1
<i>ABSTRACT</i>	2
Lista de Figuras.....	5
Lista de Tabelas.....	7
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	8
1. Introdução	9
1.1 Objetivo.....	10
1.2 Justificativa e Relevância.....	11
1.3 Estrutura do trabalho.....	12
2. Indústria 4.0	13
2.1 <i>Cyber-Physical Production Systems (CPPS)</i>	22
2.2 Máquina Ferramenta na Indústria 4.0.....	30
2.3 Padrão de comunicação MT Connect.....	37
3. Materiais e Método	42
3.1 Materiais	42
3.1.1 Centro de Usinagem Vertical D 1250 V5.0 ROMI	43
3.1.2 Centro de Usinagem Horizontal PH 630 V4.0 ROMI	43
3.1.3 Centro de Torneamento GL 300 M V4.0 ROMI	44
3.1.4 Controlador.....	45
3.2 Método.....	45
3.3 Experimentos.....	50
4. Resultados e Discussões.....	60
4.1 Validação da arquitetura de comunicação.....	60
4.1.1 Integrável.....	61
4.1.2 Estável.....	61

4.1.3	Flexível	62
4.1.4	Escalável	62
4.1.5	Acessível	63
4.2	Proposta de melhoria da arquitetura	63
4.2.1	Criação de elementos com atributo tipo Condition	64
4.2.2	Pré-processamento de dados	65
4.2.3	Frequência de coleta de dados	67
4.2.4	Otimizar classe de armazenamento de dados	68
4.2.5	Estimular boas práticas na coleta dos dados	68
5.	Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros.....	69
6.	Referências Bibliográficas.....	70

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - INGREDIENTES CHAVE PARA IMPLEMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0	15
FIGURA 2 - PRINCÍPIOS DE DESENVOLVIMENTO E TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA INDÚSTRIA 4.0	17
FIGURA 3 – PLANEJAMENTO DE PROCESSO E CRONOGRAMA	19
FIGURA 4 – MÉTODO PARA INTEGRAÇÃO DE PLANEJAMENTO DE PROCESSO E CRONOGRAMA	19
FIGURA 5 – FRAMEWORK CONCEITUAL DE PPS INTELIGENTE	21
FIGURA 6 – ÁREAS ESTRUTURAIS.....	24
FIGURA 7 – AUMENTO DE VIDA DE MÁQUINA COM MANUTENÇÃO PREDITIVA	25
FIGURA 8 – ESTÁGIOS DE MATURIDADE DA INDÚSTRIA 4.0.....	28
FIGURA 9 – CAPACIDADES DA ÁREA ESTRUTURAL DE SISTEMAS DA INFORMAÇÃO.....	29
FIGURA 10 – VALOR DO DADO CONTEXTUALIZADO	30
FIGURA 11 – Arquitetura genérica de sistema para CPMT com OPC UA	33
FIGURA 12 – MODELO ESQUEMÁTICO DE GERENCIAMENTO DE CONDIÇÃO DE MÁQUINA INTELIGENTE.	35
FIGURA 13 – DIAGRAMA DE MANUTENÇÃO DISTRIBUÍDA.....	36
FIGURA 14 – ESTRUTURA DE IMPLEMENTAÇÃO BÁSICA MT CONNECT	39
FIGURA 15 – ESTRUTURA DE IMPLEMENTAÇÃO BÁSICA MT CONNECT	40
FIGURA 16 – CENTRO DE USINAGEM ROMI D1250.....	43
FIGURA 17 – CENTRO DE USINAGEM ROMI PH 630 V4.0	44
FIGURA 18 – CENTRO DE TORNEAMENTO ROMI GL 300M.....	44
FIGURA 19 – FASES DO MÉTODO EXPERIMENTAL	46
FIGURA 20 – FASE 1: SELEÇÃO DE ARQUITETURA.....	46
FIGURA 21 – ARQUITETURA EXPERIMENTAL	47
FIGURA 22 – Fase 2: Implementação de arquitetura.....	48
FIGURA 23– FASE 3: COLETA DE DADOS.....	48
FIGURA 24 – REPRESENTAÇÃO DO SERVIÇO DE NUVEM UTILIZADO	49
FIGURA 25 – FASE 4: ANÁLISE DOS DADOS	50
FIGURA 26– FASE 2 – IMPLEMENTAÇÃO DE ARQUITETURA.....	50

FIGURA 27 – INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS NA MÁQUINA – CENTRO DE USINAGEM	51
FIGURA 28 – INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS NA MÁQUINA - TORNO	51
FIGURA 29 – FLUXO DE PROGRAMAÇÃO DO CÓDIGO PARA INTERFACE DE DADOS	52
FIGURA 30 – FASE 3: COLETA DE DADOS	55
FIGURA 31 – REPRESENTAÇÃO DO SERVIÇO DE NUVEM UTILIZADO	55
FIGURA 32 – REPRESENTAÇÃO DA INGESTÃO DE DADOS	56
FIGURA 33 – REPRESENTAÇÃO DA AGREGAÇÃO DE DADOS	57
FIGURA 34 – REPRESENTAÇÃO DA VISUALIZAÇÃO DE DADOS	57
FIGURA 35 – FASE 4: ANÁLISE DOS DADOS	58
FIGURA 36 – ESTRUTURA DE IMPLEMENTAÇÃO BÁSICA MT CONNECT	64
FIGURA 37 – RELAÇÃO ENTRE VALOR E CUSTO DO DADO EM NUVEM	65
FIGURA 38 – PROPOSTA DE DISCUSSÃO DO VALOR DO DADO DE TEMPERATURA PARA PREDITIVA DO EIXO ÁRVORE.....	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - DISPOSITIVOS DE IOT INSTALADOS (MILHÕES DE UNIDADES)	14
TABELA 2 - DADOS SELECIONADOS PARA O EXPERIMENTO - MÁQUINA	53
TABELA 3 - DADOS SELECIONADOS PARA O EXPERIMENTO – PRODUÇÃO	53
TABELA 4 - DADOS SELECIONADOS PARA O EXPERIMENTO – COMPONENTES E SENSORES.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- CAM** - *Computer-aided manufacturing*
- CBM** - *Conditioned Based Maintenance*
- CNC** – *Computer Numerical Control*
- CMM** - *Coordinate Measuring Machine*
- CPMT** - *Cyber-Physical Machine Tool*
- CPPS** – *Cyber-Physical Production Systems*
- CPS** – *Cyber-Physical Systems*
- DT** - *Digital Twin*
- ERP** – *Enterprise Resource Planning*
- HMI** - *Human-Machine Interfaces*
- IA** - *Inteligência Artificial*
- ICT** - *Information and Communication Technology*
- IoS** – *Internet of Services*
- IoT** – *Internet of Things*
- KPI** - *Key Performance Indicator*
- M2M** – *Machine to Machine*
- MES** – *Manufacturing Execution System*
- MRP** – *Manufacturing Resource Planning*
- MTDT** - *Machine Tool Digital Twin*
- PdM** - *Predictive Maintenance*
- PPS** - *Production Planning System*
- SCM** – *Supply Chain Management*
- SCP** – *Smart, Connected Product*
- TI** – *Tecnologia da Informação*

1. INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 permite avanço na manufatura ao torna-la inteligente, conectada e descentralizada, onde o principal objetivo é aumentar a eficiência de custo e tempo. Isso ocorre através do *Cyber-Physical Production System* (CPPS), que permite a comunicação contínua entre humano, máquina e produto (ALBERS *et al.*, 2016).

Os dados precisam ser coletados diretamente de sensores, dispositivos, controladores ou de sistemas empresariais como *Enterprise Resource Planning* (ERP), *Manufacturing Execution System* (MES) e *Coordinate-Measuring Machine* (CMM) (BAGHERI *et al.*, 2015).

A dificuldade de coleta dos dados de chão de fábrica para entrada nos sistemas de informação é anterior ao conceito de Indústria 4.0, (SAHAY e RANJAN, 2008) apontam essa dificuldade devido a não padronização das interfaces e formatos de dados, muitas vezes particular a cada equipamento. Não existe um protocolo de comunicação industrial unificado (HADDARA e ELRAGAL, 2015; GRUBIC, 2014).

Existe uma tendência na indústria de unificação dos protocolos de comunicação, pois para facilitar esta integração entre diversos componentes, recentemente protocolos e padrões de comunicação como MT Connect e OPC-UA foram adotados para este tipo de aplicação (LIU e XU, 2017).

Dentro de um contexto da Indústria 4.0, componentes instalados nos equipamentos de produção se comunicam em diferentes protocolos e interfaces, sendo inviável substituir todos eles por um único e específico protocolo e interface. Nota-se que apesar de ocorrer uma mudança de paradigma na produção industrial, essa questão de comunicação continua sendo um obstáculo para a implementação da Indústria 4.0 (THEORIN *et al.*, 2017).

Sendo a arquitetura de comunicação o conjunto de camadas e protocolos que um sistema de comunicação possui. A arquitetura de coleta de dados voltado para a Indústria 4.0 deve ter como requisito atender ao atual momento da indústria, prevendo integração dos novos sistemas com os sistemas legados. Porém, também deve ser pensado de forma que esteja preparada para o futuro, sendo flexível para permitir novos formatos de dados e protocolos quando estes surgirem e que sejam escaláveis, pois os sistemas de manufatura inteligente precisam ter a habilidade de aumentar de escala de forma fácil, conforme a demanda (O'DONOVAN *et al.*, 2015).

Esta pesquisa é um estudo de caso executado em uma empresa multinacional fabricante de máquinas-ferramenta de origem brasileira, a qual está em um cenário em que seus concorrentes já possuem ou estão desenvolvendo máquinas capazes de se conectar no contexto de CPPS.

Para se manter competitiva, foi determinado pela empresa a necessidade de ter em seu catálogo máquinas-ferramentas preparadas para esse contexto de Indústria 4.0, porém, para tal adotou a postura de executar este projeto em parceria acadêmica pois existe o seguinte problema de pesquisa “Como desenvolver uma arquitetura capaz de integrar máquinas-ferramenta no contexto de CPPS atendendo os requisitos da empresa?”.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver uma arquitetura de comunicação capaz de integrar máquinas-ferramenta no contexto do CPPS.

O objetivo específico é através da pesquisa apontar uma arquitetura de comunicação considerando performance, características e possibilidades do sistema, pois aspectos de natureza técnica específica referentes a coleta, manipulação, transferência e armazenamento dos dados influenciam diretamente no valor dos dados, aspectos técnicos estes que não compreendem a manufatura em si, portanto fogem do entendimento comum dos pesquisadores e profissionais da área em sua maioria.

Delimitações:

- A arquitetura de comunicação considerou máquinas ferramentas com 2 tipos diferentes de CNC, sendo esses Siemens 828D e Fanuc 0iF, os quais se comunicam em protocolo OPC UA e FOCAS2, respectivamente. Esta delimitação foi feita por permitir uma maior amostragem dentro das opções apresentadas pelo parceiro;
- A arquitetura de comunicação considerou uma plataforma capaz de inserir sensores através da controladora selecionada pelo fabricante, sendo o foco em criar a plataforma e não a aplicação dos sensores. Esta delimitação foi criada pois ainda não existe recurso disponível para desenvolvimento de sensores.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A empresa parceira na qual a pesquisa foi realizada necessita que suas máquinas atendam as demandas de mercado e estejam preparadas para os avanços proporcionados pela a Indústria 4.0. Para a determinação da viabilidade e requisitos do projeto, foram consideradas, além da referência de literatura, as demandas de mercado e o posicionamento dos concorrentes.

Foi verificado que vários concorrentes já possuem ou estão desenvolvendo máquinas-ferramenta capazes de se conectar ao CPPS. Foi verificado também que existe uma demanda crescente de mercado para este tipo de equipamento, ou seja, a empresa detectou a necessidade de desenvolver suas máquinas com esta funcionalidade.

O desenvolvimento e implementação de sistemas de manufatura inteligente requer mão de obra multidisciplinar, como engenheiros de computação, análise, projeto, automação e produção (O'DONOVAN *et al.*, 2015). Para que a implementação do conceito de Indústria 4.0 na empresa tenha sucesso, o ponto mais importante é definir a estratégia de digitalização, em que esta deve ser desenvolvida para o CPPS, *Internet of Things* (IoT) e *Internet of Services* (IoS) (SONY e NAIK, 2019).

Implementações multidisciplinares podem causar problemas de interação entre os responsáveis pelas definições estratégicas e de implementação técnica, pois aspectos de natureza específica podem afetar a viabilidade técnica e financeira do projeto, ao passo que alterações técnicas podem afetar o modelo do negócio.

A definição de uma arquitetura integrada ao CPPS requer uma constante otimização, prevendo a interação entre setores estratégicos e técnicos, com o objetivo de avaliar o impacto técnico e financeiro de cada mudança, bem como novas oportunidades e temeridades do sistema.

Este trabalho propõe uma arquitetura de comunicação a qual seja possível otimizar e desenvolver de forma contínua, garantindo desta forma um maior alinhamento com as necessidades da indústria no aspecto financeiro e técnico. Dito isso, o trabalho visa trazer este conhecimento aplicado na indústria ao contexto acadêmico, permitindo um melhor entendimento da resultante dos conceitos teóricos nesta pesquisa levantados.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta pesquisa está estruturada em seis capítulos, sendo:

Capítulo 1 – Introdução: capítulo introdutório para contextualização do tema, identificação do objetivo geral e específico, justificativa do trabalho, bem como sua relevância.

Capítulo 2 – Revisão da literatura: referencial teórico-conceitual, tendo como objetivo apresentar os conceitos de Indústria 4.0, suas tecnologias habilitadoras e o detalhamento do conceito de *Cyber-Physical Production System*. Além disso, é apresentado os principais aspectos da máquina-ferramenta dentro do contexto da indústria 4.0.

Capítulo 3 – Materiais e Métodos: apresenta qual metodologia foi aplicada, os equipamentos utilizados no estudo de caso e o trabalho experimental realizado.

Capítulo 4 – Resultados e Discussões: apresenta os resultados obtidos no trabalho experimental e sua respectiva discussão.

Capítulo 5 – Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros: apresenta a conclusão do estudo baseado nos resultados obtidos dos experimentos realizados, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo Referências Bibliográficas: fontes bibliográficas utilizadas para a elaboração do estudo teórico.

2. INDÚSTRIA 4.0

O termo Indústria 4.0 surgiu pela primeira em 2011 em Hannover, derivada do termo “Industrie 4.0” introduzido pelo governo alemão. No entanto, é importante mencionar que algumas iniciativas similares ao redor do mundo foram alavancadas por outros governos e expoentes da indústria. Dentre as mais relevantes, estão “*Industrial Internet of Things*” usado nos Estados Unidos, “*Made in China 2015*” do governo chinês e “*Factories of the Future*” de indústrias europeias (MOURTZIS *et al.*, 2018; GHOBAKHLOO, 2018).

A origem do termo relembra as três revoluções industriais ocorridas antes, sendo a primeira fruto do surgimento dos motores à vapor e mecanização no final do século XVII, a segunda revolução ocorreu com as linhas de montagem alavancadas por equipamentos elétricos e finalmente a terceira com o advento do uso de sistemas computadorizados e automações nos processos produtivos, este ocorrido na década de 1970, ou seja, forma necessários quase 200 anos para que ocorressem as três primeiras revoluções industriais (KAGERMAN *et al.*, 2013; GHOBAKHLOO, 2018).

Ao inserir no ambiente de manufatura tecnologias como *Internet of Thing* (IoT) e *Internet of Services* (IoS), surge a Indústria 4.0 com grande potencial. Assim como as revoluções anteriores, de acordo com Schuh *et al.* (2017) vários estudos

apontam investimentos entre 100 e 150 bilhões de euros na Indústria 4.0, apenas considerando Alemanha.

Indústria 4.0 direciona para a manufatura inteligente, pois por meio do *Cyber-Physical Production System* (CPPS), permite que esta esteja conectada e descentralizada, ao manter conectados homem, máquina e produto durante todo o processo de manufatura, focando no aumento de eficiência e qualidade (ALBERS *et al.*, 2016).

Na década de 1990 ocorreu o fenômeno da internet, sendo vital para o surgimento da IoT e, posteriormente, da Indústria 4.0. A união desses dois conceitos permite que as empresas se adequem ao mercado cada vez mais competitivo, pois com a IoT é possível que as companhias saibam como seus produtos são utilizados pelos usuários, permitindo que toda a cadeia do produto possa ser remodelada e garantir que as demandas por qualidade, variedade e velocidade de entrega sejam atendidas (RYMASZEWSKA *et al.*, 2017; GHOBAKHLOO, 2018; LEE *et al.*, 2014). O potencial dessa tecnologia pode ser observado na Tabela 1.

TABELA 1 - DISPOSITIVOS DE IoT INSTALADOS (MILHÕES DE UNIDADES)

CATEGORIA	2016	2017	2018	2020
Consumidor	39.630	52.443	70.363	128.630
Negócios	24.187	31.364	41.603	75.524
Total	63.818	83.806	111.966	204.154

FONTE: (YU *ET AL.*, 2019)

As oportunidades de negócios associada à Indústria 4.0 trazem desenvolvimento de *hardware*, *software* e sistemas voltados para a realidade ou adaptados de outros serviços como, por exemplo, apontado por Ghobakhloo (2018) com a adequação da ferramenta *Watson* da empresa IBM para a realidade fabril, gerando o *IBM Watson IoT*, que permite o uso de inteligência artificial cognitiva na manufatura. No entanto, como elencado em Emmanouilidis *et al.* (2019), não basta a tecnologia de inteligência cognitiva estar disponível, é necessário seu

aceite dentro do cenário da manufatura antes do uso de forma efetiva na Indústria 4.0.

É importante que seja clara a definição dos modelos de negócio, questões sobre como e quais dados serão coletados e compartilhados precisam ser respondidas, pois a definição da propriedade de cada dado industrial precisa ser clara para que estes não sejam utilizados por concorrentes ou colaboradores não autorizados (FERNÁNDEZ-MIRANDA *et al.*, 2017).

De acordo com Sony e Naik (2019), as organizações em seu nível estratégico devem considerar que a Indústria 4.0 mudará as relações das empresas com o meio ambiente, comunidade, cadeia de valor e seres humanos. Para tal, os autores propõem seis ingredientes-chave interrelacionados, estes essenciais para a implementação da Indústria 4.0, representada na Figura 1. A imagem demonstra que aspectos além dos técnicos devem ser considerados na implementação da Indústria 4.0.

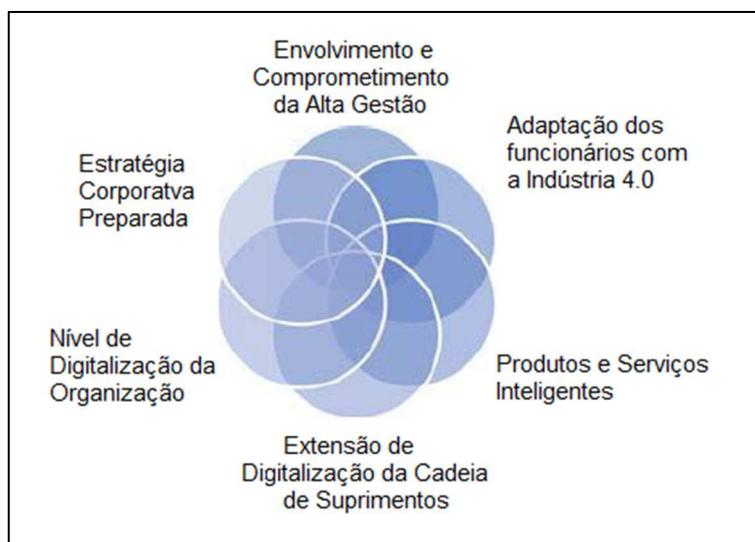


FIGURA 1 - INGREDIENTES CHAVE PARA IMPLEMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0

FONTE: (SONY E NAIK, 2019)

De acordo com Fernández-Miranda *et al.* (2017), a Indústria 4.0 conecta máquinas, pessoas e produtos pelo mundo por meio da Internet, unindo tecnologias industriais e a Internet. Esta união ocorre ao unir *Cyber-Physical*

Systems (CPS), computação em nuvem, IoT e análise de *Big Data*, realizando desta forma a troca de dados e automação das tecnologias industriais (KUMAR *et al.*, 2019).

Ao processar sistematicamente os dados de máquinas interligadas, de forma a criar um sistema colaborativo, é possível explicar incertezas deste grupo (LEE *et al.*, 2014). Porém, segundo Zheng *et al.* (2018), não basta conectar as máquina, é necessário continuamente otimizar a integração dos sistemas, focando em qualidade, performance e redução de consumo. Isso deve ser aplicado em todo ciclo de vida do produto, projeto, produção e serviço, aplicando técnicas avançadas de manufatura e integração com Inteligência Artificial (IA). Os dados precisam ser medidos por sensores ou coletados de controladores ou de sistemas empresariais de manufatura, como exemplo o ERP, MES e *Supply Chain Management* (SCM) (BAGHERI *et al.*, 2015). Este trabalho ainda aponta que as informações coletadas de todas as máquinas permitem a comparação com indicadores de máquinas semelhantes ou com os dados históricos, tendo como objetivo prever comportamentos futuros. Porém, os dados individuais só devem ser extraídos a partir de ferramentas de análise de dados.

A transmissão e análise em tempo real dos dados de toda a fábrica cria inteligência, capaz de melhorar todos os aspectos da manufatura, sendo essa a definição manufatura inteligente de O'Donovan *et al.* (2015). Essa análise em tempo real permite o aumento da produtividade por meio de ferramentas de auxílio na tomada de decisão rápida usando o *Big Data*, de acordo com Lee *et al.* (2014).

Acaba por ocorrer a transformação dos sistemas tradicionais de acordo com Mourtzis *et al.* (2018), pois a Indústria 4.0 cria novas capacidades em controle e monitoramento por meio da digitalização dos sistemas de manufatura. Para Albers *et al.* (2016), isso só será possível com a adoção de novos métodos e ferramentas, além das tecnologias habilitadoras.

É apontado em Lee *et al.* (2018) que a Indústria 4.0 e a manufatura inteligente são frutos do avanço de diversas tecnologias, como tecnologias de rede,

Information and Communication Technology (ICT), IoT, computação em nuvem e Big Data.

Na revisão sistemática de literatura, Ghobakhloo (2018) identifica os princípios e tecnologias habilitadoras chave da Indústria 4.0, conforme Figura 2. Na parte externa da figura, estão as principais tecnologias habilitadora. Já na parte interna, os princípios que viabilizam a Indústria 4.0.

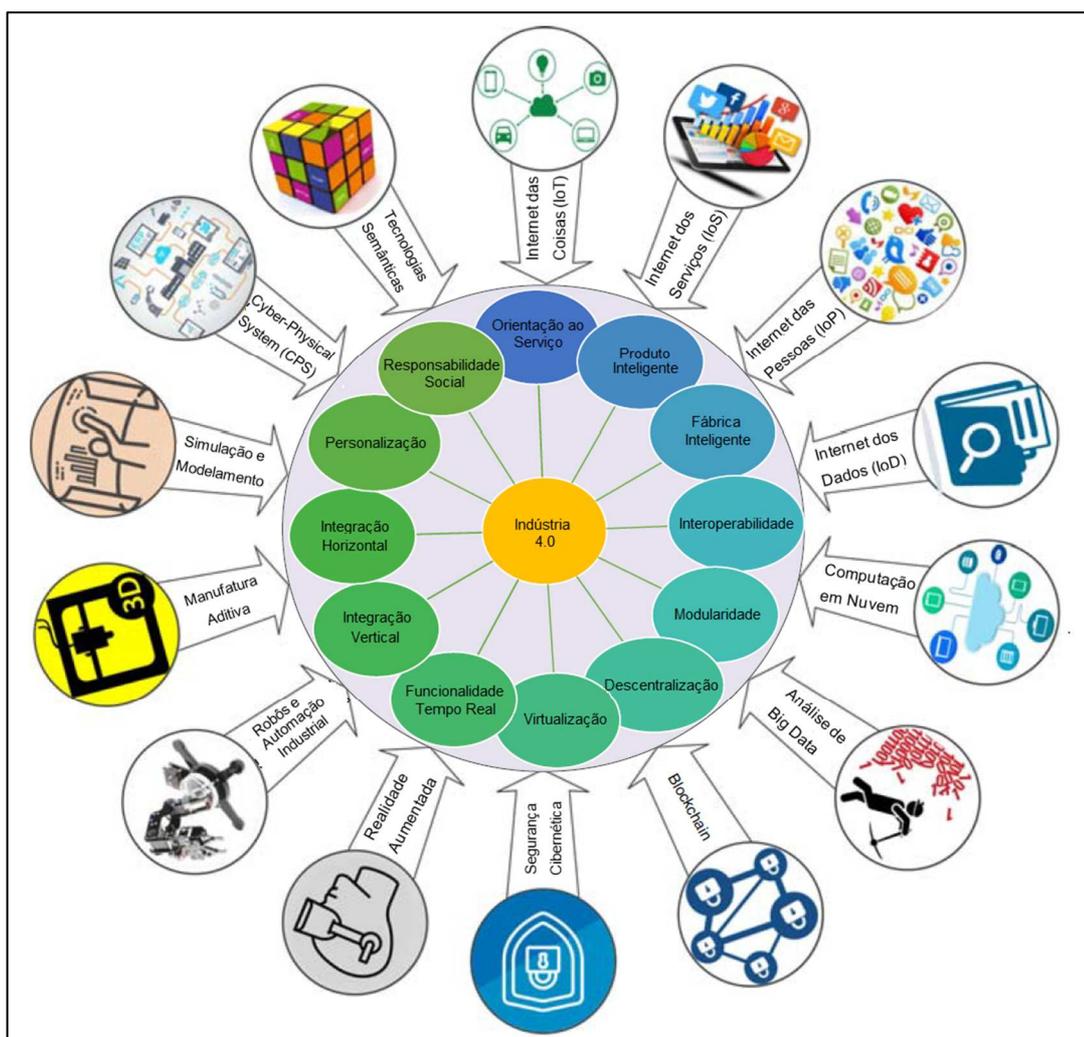


FIGURA 2 - PRINCÍPIOS DE DESENVOLVIMENTO E TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA INDÚSTRIA 4.0

FONTE: (GHOBAKHLOO, 2018)

Tecnologias habilitadoras permitem que sejam atendidas necessidades específicas de cada cliente, abrindo o mercado promissor de produtos e serviços

inteligentes. Para tal, Zheng *et al.* (2018) propõem a digitalização de usuários, dispositivos, fabricantes e provedores de serviços em nuvem. Seguindo raciocínio semelhante, Fernández-Miranda *et al.* (2017) afirma que plataformas *online* criam acesso de mercado, pois permite novos modelos de negócio com redução de custos. Isso se dá por meio de plataformas de troca de dados entre clientes e serviços. Criam-se também novas possibilidades de produtos, como no estudo de Ghobakhloo (2018) que realça o uso de manufatura aditiva por sistema de fusão seletiva laser para a confecção de peças exclusivas da fabricante Audi desde 2018, peças essas que até então seriam impossíveis de serem fabricadas.

Ao inserir as máquinas dentro de um contexto com sistemas conectados, essas deixam de ser máquinas comuns para se tornarem máquinas autoconscientes e auto desenvolvíveis, melhorando o desempenho e o gerenciamento da manutenção (LEE *et al.*, 2014). Nesse raciocínio, Lee *et al.* (2018) corroboram essa linha de pensamento e adicionam a necessidade essencial e crescente de que as fábricas sejam capazes de fazer a gestão de condição das máquinas por meio do diagnóstico e prognóstico das mesmas.

O estudo de Meissner e Aurich (2019) apresenta um modelo capaz de replanejar o processo de fabricação, respeitando o cronograma pré-determinado, demonstrado na Figura 3. Para tal, é necessário que seja inserido no sistema o plano de prioridade e qual o nível de flexibilidade do processo. Isto é definido pelo nível de concludência, que possui relação inversamente proporcional ao nível de liberdade do sistema, ou seja, através do nível de concludência define-se quanta liberdade o sistema possui para determinar alternativas em relação ao processo padrão.

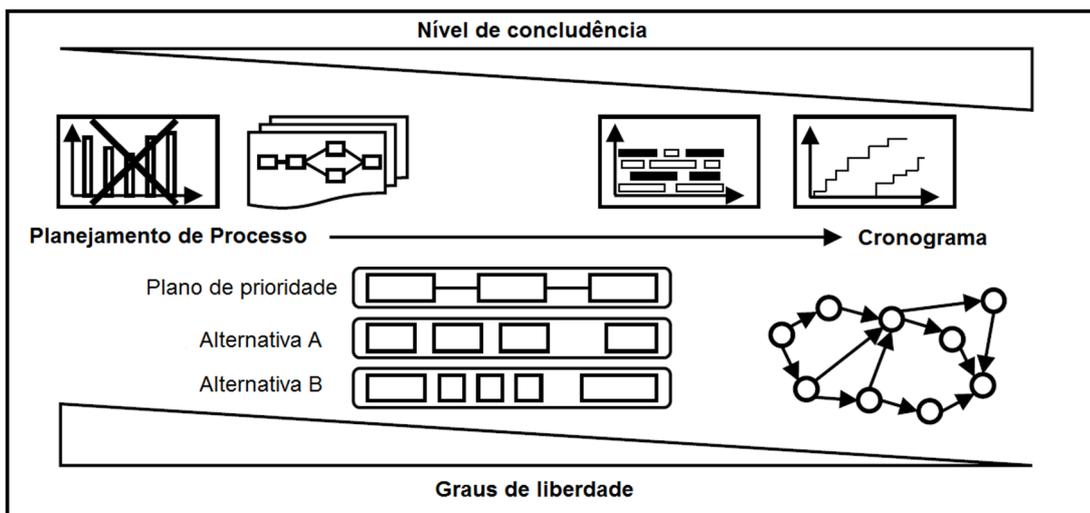


FIGURA 3 – PLANEJAMENTO DE PROCESSO E CRONOGRAMA

FONTE: (MEISSNER E AURICH, 2019)

O sistema utilizou o conceito de produção descentralizada e, caso ocorra alguma parada de máquina, este executa um plano alternativo de produção, como apresentado na Figura 4. Como demonstrado na figura, a carga de trabalho de cada máquina, tempo de espera dos processos e prioridade dos pedidos são considerados no planejamento de processo de manufatura.

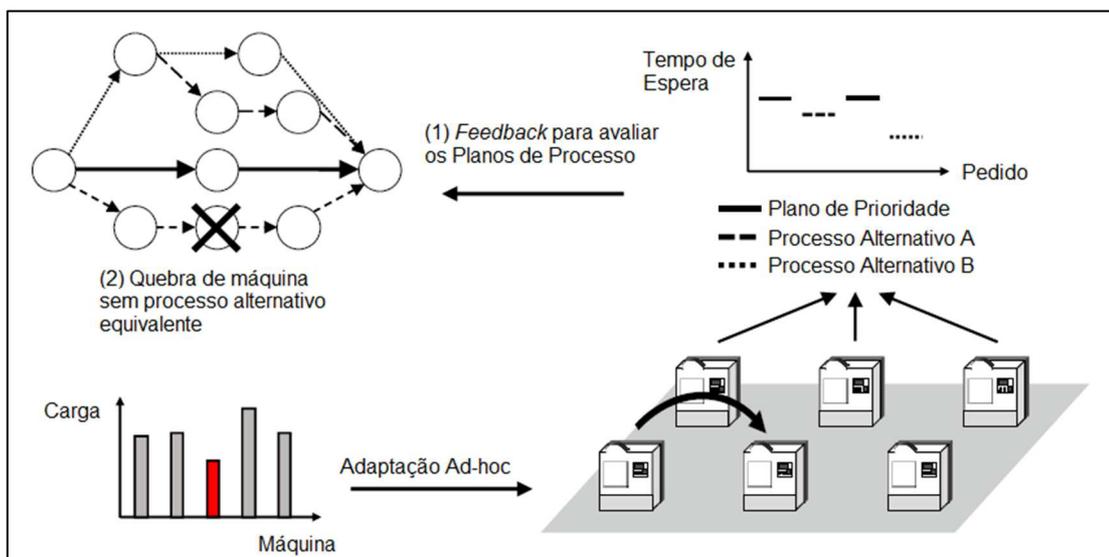


FIGURA 4 – MÉTODO PARA INTEGRAÇÃO DE PLANEJAMENTO DE PROCESSO E CRONOGRAMA

FONTE: (MEISSNER E AURICH, 2019)

A manufatura inteligente pode reduzir custos, flexibilizar a produção, diminuir o *time-to-market* do produto, além do aumento de produtividade. Porém, pode gerar redução de impacto ambiental em questões como diminuição do consumo de energia (SUPEKAR *et al.*, 2019). Ao utilizar ferramentas de análise de dados e manutenção preditiva, Fernández-Miranda *et al.* (2017) considera uma potencial diminuição de falhas no chão de fábrica e a redução de paradas de máquina em estimados 50%, além de um aumento de produtividade de 20%. Já Upasani *et al.* (2017) apontam também melhora de qualidade em conjunto com a diminuição de tempo de parada por meio da melhoria de manutenção nesse contexto. O estudo de caso de Schreiber *et al.* (2019) apresenta um sistema multicritério para tomada de decisão, que reduziu o tempo de *setup* e manutenção da máquina em 18% ao considerar as características das ferramentas como parte do gerenciamento de manutenção.

Como nos trabalhos mencionados e observado também em Ghobakhloo (2018), os benefícios da transição para a Indústria 4.0 existem e podem ser maiores que os custos envolvidos, principalmente para fabricantes de classe mundial. Porém, os desafios apontados são capacidade financeira, segurança de dados, integridade do processo de fabricação, maturidade de TI, conhecimento das competências, preparação organizacional, operacional, técnica e jurídica.

Para Sony e Naik (2019), a digitalização da organização é o ponto crucial para o sucesso da Indústria 4.0, no qual essa deve ser desenvolvida para o CPS, IoT e IoS, além de ser pensada de forma que possibilite a mudança dos produtos existentes para produtos inteligentes. Se utilizando do termo modelo teórico da manufatura, Sanchez *et al.* (2018) afirma que ferramentas como o *Deep Learning* estão crescendo e podem prever 97,4% das variações de espessura das peças usinadas no estudo de caso realizado, porém, a aplicação prática pode ser difícil. A Figura 5 apresenta uma proposta de arquitetura de *Production Planning System* (PPS). Utilizando essa ferramenta, é possível verificar como ocorrem as interações entre o mundo físico, o mundo virtual e as tecnologias habilitadoras e princípios da Indústria 4.0. As interações entre usuários, fabricantes e fornecedores de serviços ocorrem no mundo físico via *Smart, Connected Product*

(SCPs), via conexão *Digital Twin*. Os SCP fazem a interface entre essa plataforma de serviço em nuvem e os agentes do mundo físico.

Com modelos como *Infrastructure-as-a-Service* (IaaS), em que a produção e *Supply Chain* são distribuídos, a manufatura em nuvem vem crescendo ao integrar fornecedores e consumidores (CORREA *et al.*, 2018). O mesmo artigo propõe uma plataforma de CPS permitindo que recursos de Controle Numérico Computadorizado (CNC) sejam interligados, favorecendo as transações entre fornecedores de serviço de usinagem e clientes.

Em uma linha semelhante, encontra-se a servitização, que permite novos modelos de negócio de acordo com Rymaszewska *et al.* (2017). O termo servitização foi utilizado pela primeira vez por Vandermerwe e Rada em 1988, porém, com o surgimento da Indústria 4.0, sua importância cresce em decorrência da servitização transferir o risco do cliente para o fabricante. No entanto, ao monitorar em tempo real das condições da máquina e prever falhas, é possível mitigar esses riscos (GRUBIC, 2014).

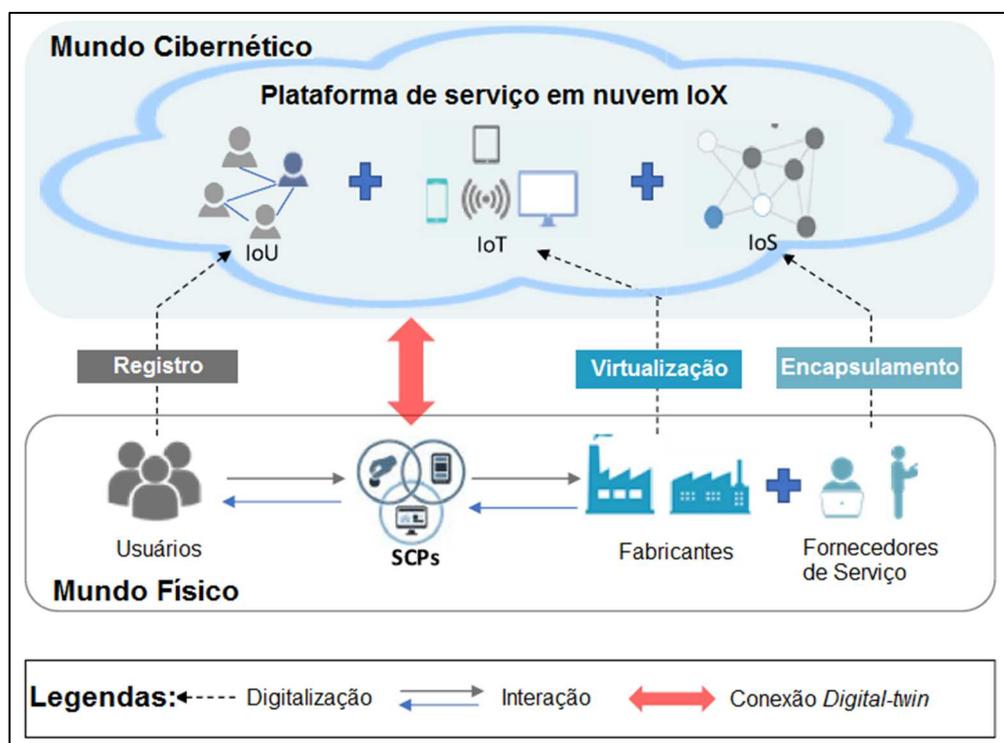


FIGURA 5 – FRAMEWORK CONCEITUAL DE PPS INTELIGENTE

FONTE: (ZHENG *ET AL.*, 2018)

Um estudo de caso é apresentado em Iriarte *et al.* (2018), em que uma empresa fabricante de máquinas-ferramenta fundada em 1954, com volume anual de faturamento de 220 milhões de Euros, demonstra a importância da servitização ao apresentar a decisão da alta gestão em inovar seu modelo de negócio, com ênfase em serviço, deixando de ser um fabricante/vendedor de máquinas, com garantia básica e serviços de manutenção, se tornando um fabricante/vendedor de soluções completas tipo *turn key* para setores específicos.

O fabricante de máquina, ao desenvolver a solução que utilizará nesse contexto, deve optar entre uma solução genérica de mercado ou uma especializada. Nessa segunda opção, existe a possibilidade de cobrar por serviços adicionais ou abrir a possibilidade de adotar o modelo de servitização (BORDELEAUB *et al.*, 2019).

Para o desenvolvimento dessa solução para máquinas-ferramenta, é necessário entender a Indústria 4.0 e onde se situa a máquina ferramenta, como pode ser verificado a seguir.

2.1 CYBER-PHYSICAL PRODUCTION SYSTEMS (CPPS)

Indústria 4.0 pode ser descrito como a intercomunicação entre sistemas de produção por CPS (KAGERMANN *et al.*, 2016). CPPS é a intercomunicação de máquinas em um ambiente de manufatura, permitindo um trabalho de forma descentralizada (MEISSNER e AURICH, 2019).

As definições de CPS se mostram muito alinhadas com o conceito de Indústria 4.0 logo este surgiu, como em Kagermann *et al.* (2016) ao afirmar que os negócios serão máquinas inteligentes, redes conectadas, sistemas de estoque e plantas de manufatura em formato de CPS, sendo estes capazes de trocar informações, acionar ações e controlar um ao outro de forma autônoma.

A Indústria 4.0, ao utilizar o CPS, permite a inovação da manufatura e dos serviços, pois as necessidades de serviço e predição de degradação da condição

dos equipamentos serão feitas a partir de algoritmos inteligentes, na medida em que *software* e inteligência embarcada são inseridos nos equipamentos (LEE *et al.*, 2014). Em uma definição mais simplificada e abrangente, Bagheri *et al.* (2015) mencionam que as tecnologias que permitem a conexão dos sistemas com o CPS permitem um monitoramento preciso e sincronismo entre os sistemas físicos e os sistemas cibernéticos computacionais.

As técnicas de planejamento de produção tradicionais serão substituídas por outras que utilizam as capacidades do CPS, pois a combinação de sensores com infraestrutura computacional está cada vez mais difundida no chão de fábrica, permitindo uma manutenção mais eficiente (UPASANI *et al.*, 2017).

O CPS pode ser descrito como a junção entre engenharia de sistemas e dispositivos de computação e comunicação, que habilitam controle e tomada de decisão descentralizada como, por exemplo, estimativa de tempo de vida de ferramentas (KUMAR *et al.*, 2019).

As redes de IoT ganharam escala e eficiência devido à velocidade de transmissão dos dados via CPS (YU *et al.*, 2019), permitindo uma melhor interação entre pessoas e pessoas, pessoas e dispositivos, dispositivos e dispositivos, sendo estas físicos ou digitais. Cada vez mais, as máquinas são dotadas de sensores, permitindo que os dados com a tecnologia CPS alimentem um ecossistema dotado de sensores, além da comunicação dos dados, modelamento dos dados e tomada de decisão (MOURTZIS *et al.*, 2018).

O ecossistema baseado em CPPS permite a descentralização da produção, em que os itens manufaturados definem seu próprio sistema de fabricação e cronograma. Por exemplo, duas peças idênticas podem ser produzidas por dois processos distintos (MEISSNER e AURICH, 2019). Para tal, se faz necessário garantir a confiabilidade de todo o sistema para que o serviço seja ofertado e o modelo digital seja confiável (MUBAROK *et al.*, 2018).

Dentro do modelo de desenvolvimento da Indústria 4.0 apresentado em Schuh *et al.* (2017), conforme Figura 6, existem 4 áreas estruturais responsáveis por

tornar possível a Indústria 4.0 sendo estas recursos, estrutura organizacional, cultura e sistemas da informação. O documento apresenta a igual importância entre todas essas áreas estruturais, apontando a necessidade de atingir elevados índices de maturidade em todas elas para alcançar o resultado esperado com a Indústria 4.0. Embora esteja clara a importância de todas as áreas, este trabalho foca na área estrutural Sistemas da informação.

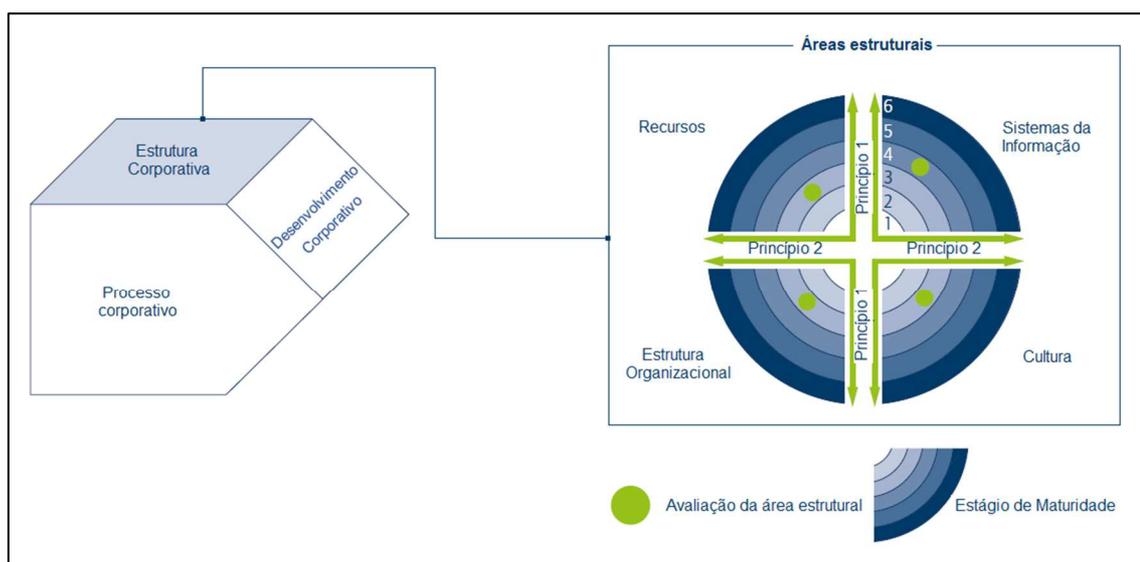


FIGURA 6 – ÁREAS ESTRUTURAIS

FONTE: (SCHUH *ET AL.*, 2017)

O CPS está ligado à todas as áreas do Sistema da Informação, pois, de acordo com o artigo que apresenta este modelo (SCHUH *et al.*, 2017), até que o dado seja tratado com o objetivo de possuir um formato adequado, este não é informação. Chegando ao primeiro princípio dos sistemas da informação, os dados devem ser processados e preparados, de forma a qual suportem a tomada de decisão.

Assim como as definições da Indústria 4.0 estão conectadas ao CPS com o tempo, as justificativas também estão conectadas, como pode ser visto em Lee *et al.* (2014) ao afirmar que CPS e inovação dos serviços são duas tendências inevitáveis e desafios para a manufatura. Já no trabalho de Oks *et al.* (2018), o CPS não é apontado como tendência e sim como grande potencial de criação

de valor por meio da digitalização. Ao integrar os processos de clientes e *Supply Chains* utilizando CPS, estes serão mais eficientes e, por consequência, mais produtivos, gerando grande economia em material e energia, além de permitir a exploração de novos modelos de negócio por meio da digitalização (FERNÁNDEZ-MIRANDA *et al.*, 2017).

Comparar dados entre máquinas conectadas ao CPS permite que a otimização da manutenção seja realizada (BAGHERI *et al.*, 2015). O monitoramento e análise remoto dos dados por meio do CPS e técnicas avançadas de análise de dados permitem a implementação de filosofias de manutenção como *Conditioned Based Maintenance* (CBM) ou *Predictive Maintenance* (PdM) (KUMAR *et al.*, 2019). A Figura 7 apresenta o ganho de vida da máquina ao adotar o PdM. Ao ocorrer algum defeito não considerado na expectativa de vida normal, é possível obter ganho de vida do equipamento ao executar a manutenção não programada com o uso do PdM.

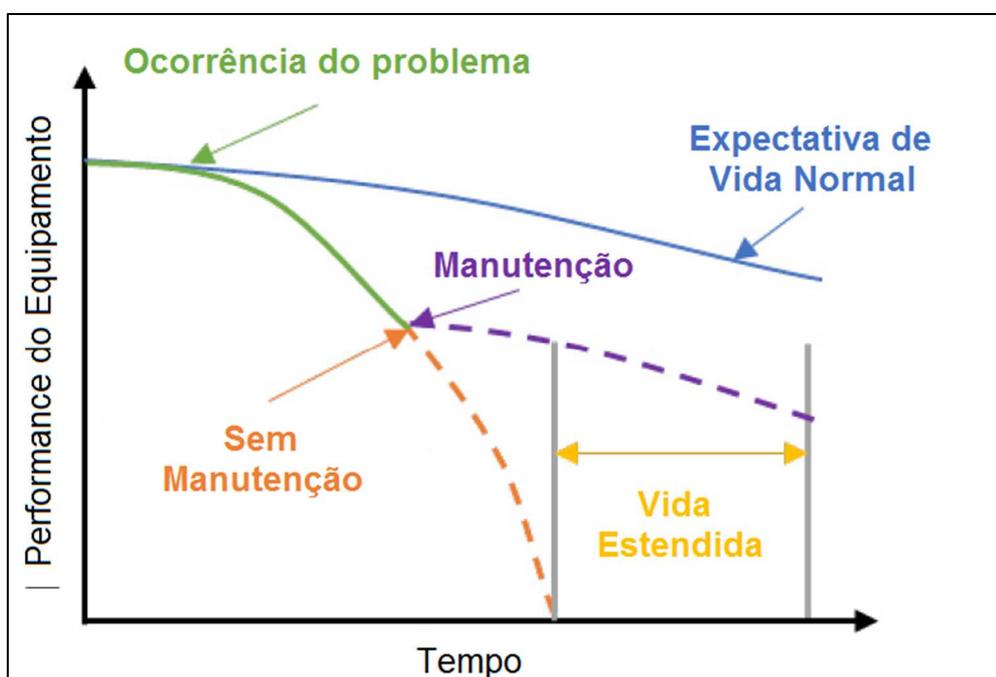


FIGURA 7 – AUMENTO DE VIDA DE MÁQUINA COM MANUTENÇÃO PREDITIVA

FONTE: (LEE *ET AL.*, 2019)

Diferente dos sistemas tradicionais, o PdM associado ao CPPS permite identificação rápida de eventos no chão de fábrica, diminuindo as consequências

dos mesmos para a produção, bem como para os equipamentos (BERGER *et al.*, 2019).

Para que seja feito o desenvolvimento do CPS, Bagheri *et al.* (2015) apontam, como primeiro passo, garantir precisão e confiabilidade dos dados. Estes dados precisam transitar pelo CPPS na forma de um fluxo otimizado, para que a informação impacte positivamente no planejamento do processo, analisando a performance das diferentes possibilidades do parque fabril (MEISSNER e AURICH, 2019).

Após a implementação do CPPS num processo produtivo existente, se faz necessário verificar a necessidade de alterar os *Key Performance Indicators* (KPIs), conforme apresentado no trabalho de Samir *et al.* (2018). Essa implementação pode variar dependendo do processo produtivo. No entanto, deve haver uma garantia de aumento na eficiência, resiliência e conectividade do sistema de produção. Caso contrário, não se justifica o investimento por não haver avanço no sentido da Indústria 4.0 (BAGHERI *et al.*, 2015).

Para Kagermann *et al.* (2016), os dados precisam ser descentralizados, pois desta forma podem ser utilizados ao longo de toda a cadeia de valor, focando sempre em permitir o uso desse dado de forma ágil. Considerando o desenvolvimento do CPS, Bagheri *et al.* (2015) apontam como primeiro passo garantir precisão e confiabilidade dos dados.

Máquinas-ferramenta devem se integrar à manufatura, de forma que esta monitore e controle o processo de usinagem com malhas de *feedback*. Essas malhas devem ser capazes de permitir que a máquina real afete o modelo virtual e vice versa (LIU *et al.*, 2019). O autor aponta a importância de haver a integração vertical e horizontal, sendo a vertical descrita como aquela que foca no desenvolvimento de engenharia, planejamento e montagem, integrando CAD, *Computer-aided manufacturing* (CAM) e CNC. Já a integração horizontal é apontada como a integração entre máquina ferramenta e diferentes dispositivos de manufatura e recursos, como robôs esteiras, dispositivos de medição e *Manufacturing Resource Planning* (MRP) ou ERP, permitindo a comunicação via

Machine to Machine (M2M) e, conseqüentemente, sistemas de manufatura cooperativos.

O CPPS é uma das tecnologias necessárias para o desenvolvimento da manufatura inteligente. Tecnologias como IoT, *Cloud Computing*, *Big Data* e Inteligência Artificial, por sua vez, são estimuladores para seu crescimento a medida que evoluem (TAO *et al.*, 2019). Por meio do CPPS ocorre a interação, em tempo real, entre CPS e *Digital Twin* (DT), gerando uma intensa integração e colaboração, pois as malhas de *feedback* afetam o modelo cibernético e vice-versa, permitindo uma maior eficiência na manufatura.

Para aplicações mais robustas, se faz necessário utilizar aplicações de CPS dedicadas, em que fatores como obsolescência de *hardware* podem comprometer fatores como confiabilidade, disponibilidade, manutenção e custos para manter o sistema operando (ALELYANI *et al.*, 2019). Soluções chamadas de “prateleira” não tendem a atender este tipo de aplicação, apesar do autor não encontrar estudos acadêmicos apontando as reais necessidades de clientes deste tipo. Para que sistemas CPPS sejam implementados, é necessário que desafios organizacionais e tecnológicos sejam observados, prevendo aspectos econômicos e técnicos, assim como a implementação dos componentes para garantir as funcionalidades elencadas no projeto (OKS *et al.*, 2018). Alguns requisitos precisam ser observados para garantir que ocorra uma rápida adequação do planejamento de produção e controle dos processos aos desafios inerentes ao processo produtivo em constante evolução, sendo estes a capacidade de um sistema de controle que permita a habilidade de responder com rapidez, priorização logística dinâmica nos setores produtivos e transferência dos dados estatísticos de produção para os sistemas de controle de manufatura (BERGER *et al.*, 2019).

Para tanto, a estrutura do sistema precisa estar preparada para que este atinja os níveis necessários de maturidade dentro do conceito de Indústria 4.0, como representado na Figura 8. Trata-se de um modelo em que (SCHUH *et al.*, 2017) apresenta quais passos existem entre a digitalização e o nível mais avançado da Indústria 4.0 onde é possível que o sistema de manufatura otimize de forma

autônoma. A definição de qual estágio de maturidade se deseja alcançar é muito importante, pois garante que a expectativa inicial seja atendida, bem como torna possível definir meios de permitir a evolução do sistema para níveis maiores de maturidade caso seja necessário.

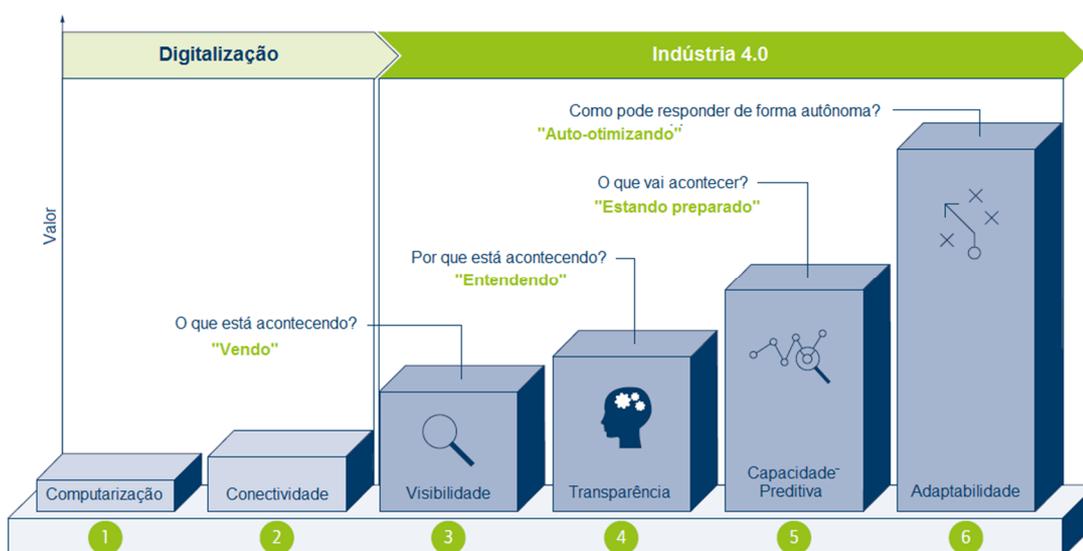


FIGURA 8 – ESTÁGIOS DE MATURIDADE DA INDÚSTRIA 4.0

FONTE: (SCHUH *ET AL.*, 2017)

Essa necessidade em garantir aspectos de evolução do sistema que não obriguem uma completa substituição do parque fabril existente, bem como a constante substituição de equipamentos do sistema quando ocorrer uma evolução tecnológica ou expansão dos sistemas, pode ser verificada em O'donovan *et al.* (2015). O autor aponta algumas características para garantir o processamento de dados industriais em grande escala, para que este sistema seja capaz de coletar automaticamente os dados de forma simplificada, evitando falhas e prevendo escalabilidade do sistema. Estas características são:

- **Integração de sistemas legados:** permitir que os sistemas legados sejam integrados ao CPS, verificando a viabilidade de substituição por sistemas IoT;
- **Comunicação entre redes:** prever a comunicação entre diferentes redes de forma segura e estável;

- **Estabilidade:** com a manufatura inteligente, qualquer falha no CPS impactará na produção. Dito isso, o sistema deve garantir redundância para que as falhas sejam minimizadas e diminua o impacto das mesmas caso ocorram;
- **Flexibilidade:** novas tecnologias, protocolos e formatos de dados surgem com frequência; estes garantem maior eficiência e segurança. É importante que o sistema seja capaz de se integrar com essas evoluções;
- **Escalabilidade:** o número de dispositivos conectados ao CPS cresce rapidamente, no qual estudos apontam que crescerão em uma escala ainda maior. Para tanto, o CPS deve estar preparado para conectar mais dispositivos, sem haver grande impacto;
- **Acessibilidade:** com a integração cada vez maior entre redes e sistemas, é de vital importância que o sistema e seus dados adotem protocolos e padrões abertos de comunicação.

Dentro da área estrutural, conhecida por Sistemas da Informação conforme representado na Figura 9, esta possui capacidades inerentes ao CPPS, sendo que a arquitetura do sistema deve prever que as capacidades sejam atendidas para garantir o bom funcionamento do sistema de manufatura inteligente. Isso requer, principalmente, padronização de interface, flexibilidade, sistemas abertos, segurança de Tecnologia da Informação (TI) e qualidade dos dados (SCHUH *et al.*, 2017). Dentro da área dos Sistemas da Informação, é importante desenvolver os eixos de integração e processamento da informação para alcançar um elevado índice de maturidade. Esta pesquisa se limita a trabalhar o eixo de integração.

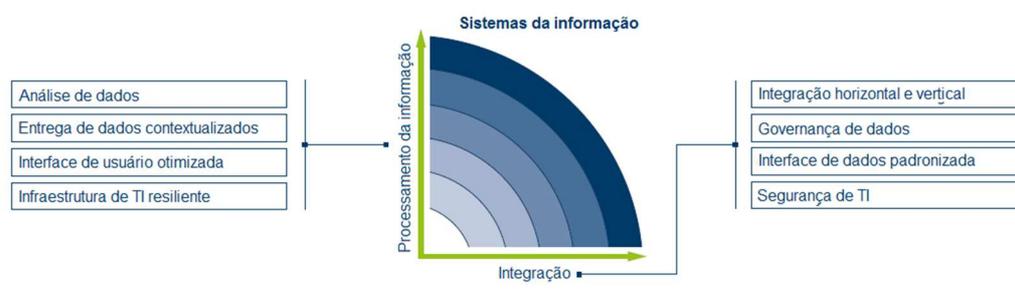


FIGURA 9 – CAPACIDADES DA ÁREA ESTRUTURAL DE SISTEMAS DA INFORMAÇÃO

FONTE: (SCHUH *ET AL.*, 2017)

A qualidade dos dados, bem como o conhecimento do contexto dos dados, garante seu real valor. Os dados são manipulados ao longo de seu caminho no CPS. O objetivo dessa manipulação é que o dado ganhe valor (dado este chamado de cru), este possuindo pouco valor por estar fora de contexto (EMMANOUILIDIS *et al.*, 2019). A Figura 10 demonstra o ganho de valor ao adicionar informação, conhecimento e contexto ao dado coletado. No exemplo, o dado foi coletado e, posteriormente, definido que se trata do tempo de produção de uma linha específica. Na sequência, foi determinado que o valor de produção está abaixo da média e que deve ser realizada inspeção na linha. Na última fase, foi indicado possível causa e efeito no processo de produção.

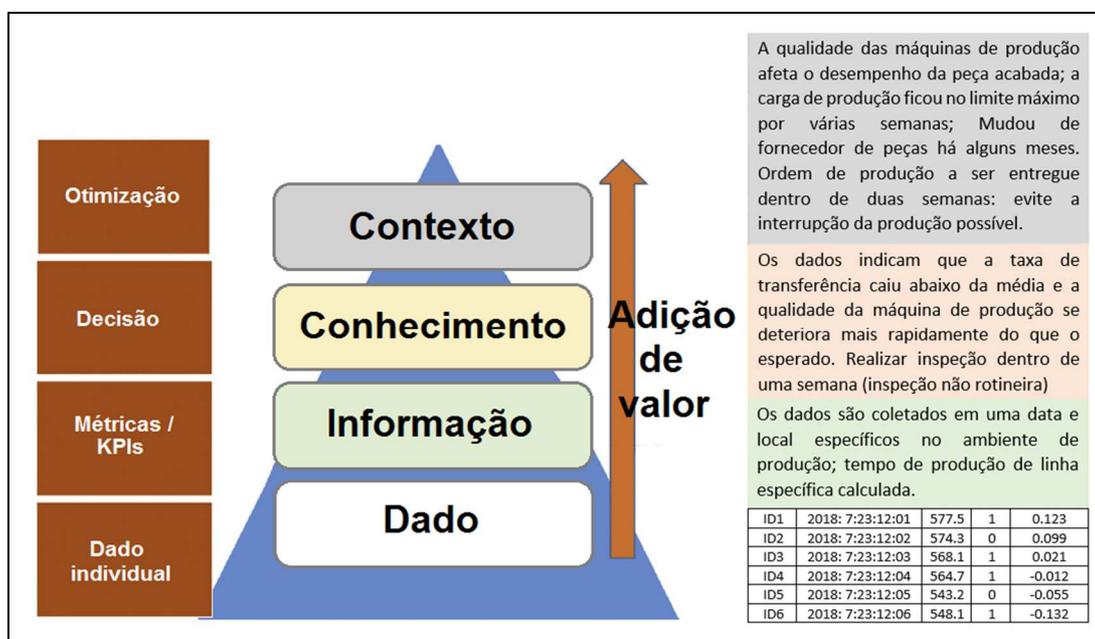


FIGURA 10 – VALOR DO DADO CONTEXTUALIZADO

FONTE: (EMMANOUILIDIS *ET AL.*, 2019)

2.2 MÁQUINA FERRAMENTA NA INDÚSTRIA 4.0

Tradicionalmente, são utilizadas abordagens empíricas quando se trata de otimização de máquinas-ferramenta. Os processos envolvendo máquinas-ferramenta possuem um grande número de fenômenos e variáveis, sendo dessa

forma difícil a aplicação de modelos teóricos. No entanto, esses processos são interessantes para o entendimento dos fenômenos físicos (SANCHEZ *et al.*, 2018).

O conceito de *Cyber-Physical Machine Tool* (CPMT) é apresentado em Liu *et al.* (2019), no qual definem o conceito como máquinas-ferramenta mais inteligentes, bem conectadas, amplamente acessíveis, mais adaptativas e autônomas. De acordo com este trabalho, a CPMT é baseada em tecnologias como CPS, IoT e tecnologias em nuvem, permitindo desta forma o surgimento da máquina ferramenta 4.0.

CPMT requer que o CNC seja mais versátil, expansível, adaptável e flexível para o CPS, que permitam monitoramento em tempo real para controle dos processos produtivos. Partindo dessa premissa, Deng *et al.* (2018) afirmam que a próxima geração de CNC tende a ser de arquitetura aberta.

De acordo com Fernández-Miranda *et al.* (2017), as empresas precisarão adaptar seus produtos para esta nova dinâmica de manufatura. No entanto, para o sucesso dessa remodelação de produto, será necessário mão de obra capacitada, com mais autonomia, criatividade e capazes de tomar decisões, para desta forma criar inovação a partir da nova realidade.

As aplicações que apresentam a união entre máquina ferramenta e CPS surgem ao compasso das evoluções das tecnologias habilitadoras. Župerl e Čuš (2019), por exemplo, apontam um estudo que aplica em uma fresadora um sensor ótico inteligente que transfere, em tempo real para a nuvem, o tamanho do cavaco gerado pela usinagem. A partir da análise do tamanho do cavaco, é possível determinar a rugosidade superficial da peça e, dessa forma, alterar os parâmetros da máquina para que a mesma se adapte à rugosidade especificada de forma autônoma. Isso é possível apenas por meio da união de computação e serviços em nuvem com a máquina ferramenta, utilizando IoT, processamento avançado de sinais de sensores, computação na borda, funcionalidades de extração de processo, *Machine learning*, modelamento de processos, análise de

dados e controle cognitivo de processo. Ou seja, ao integrar diversas tecnologias habilitadoras.

Aplicações geralmente focam na otimização dos processos. Gittler *et al.* (2019) apresentam uma metodologia para otimização dos processos, em que utilizou-se um método de medição de múltiplos canais conectados via protocolo Fanuc FOCAS, em que os dados de diversas máquinas-ferramenta são coletados e combinados, sendo possível comparar as máquinas. Além disso, por meio da análise estatística, é possível determinar a eficiência e a degradação de componentes das máquinas, com o intuito de melhorar disponibilidade, performance e qualidade.

A Figura 12 aponta uma proposta de CPMT baseada em protocolo OPC UA. Na proposta, os dispositivos físicos incluindo o CNC da máquina são responsáveis pela coleta dos dados em tempo real para um modelo virtual da máquina, conhecido por *Digital-twin*, o qual, através da malha de *feedback* de otimização, implementa otimizações em tempo real na máquina física. Os técnicos de chão de fábrica, por sua vez, recebem suporte na tomada de decisão de processo e manutenção por meio de ferramentas de visualização, monitoramento e simulação. Desenvolvedores de produto e processistas recebem dados estratificados para melhorarem o produto e processo (LIU *et al.*, 2019).

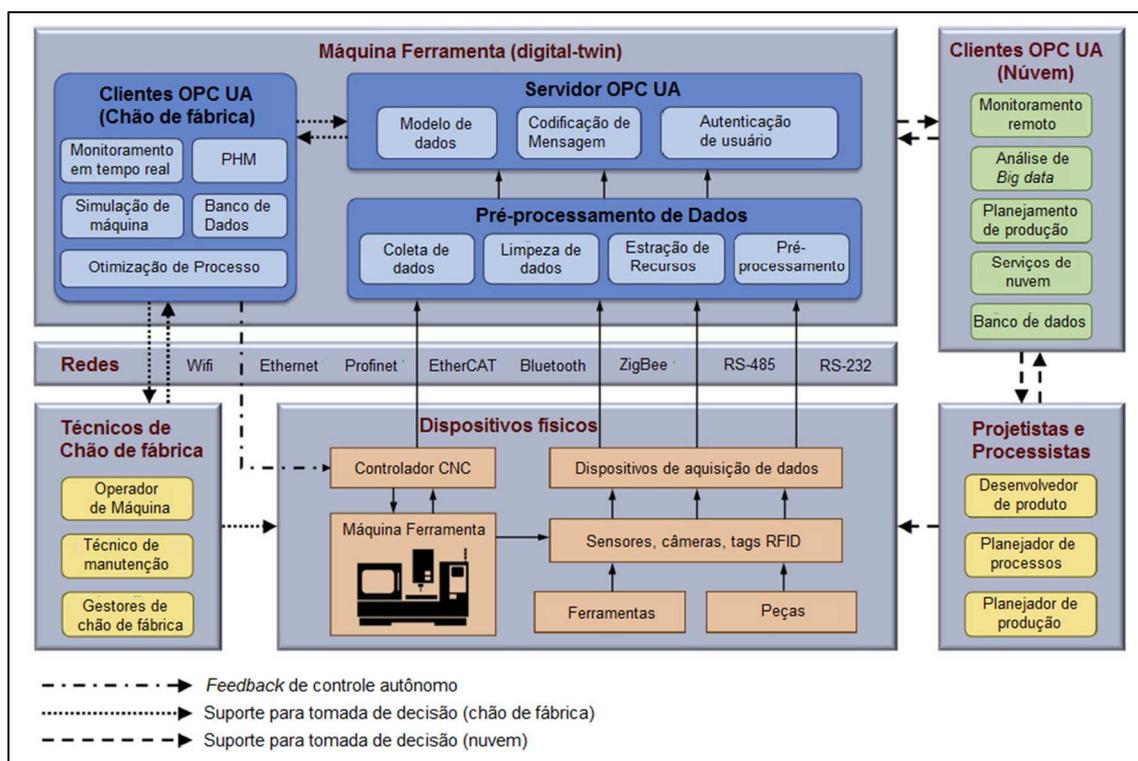


FIGURA 11 – Arquitetura genérica de sistema para CPMT com OPC UA

FONTE: (LIU ET AL., 2019)

Com o monitoramento das condições das máquinas em tempo real, é possível que os dados da condição da máquina sejam armazenados e, posteriormente, utilizado por controladores da máquina para realizar controles adaptativos e tomadas de decisão otimizadas, criando desta forma máquinas mais inteligentes e capazes, de forma autônoma, se otimizar e cuidar de sua condição (DENG *et al.*, 2018).

De acordo com Meissner e Aurich (2019), ao inserir as máquinas-ferramenta dentro do contexto de CPPS, é possível a produção descentralizada, havendo impacto direto no planejamento de processo devido ao aumento de flexibilidade. Para que as máquinas-ferramenta estejam preparadas para esse cenário de produção descentralizada, estas precisam alcançar urgentemente um maior nível de conectividade, acessibilidade, inteligência e autonomia (LIU *et al.*, 2019).

A grande diferença e principal avanço da CPMT em relação as máquinas-ferramenta tradicionais está no *Machine Tool Digital Twin* (MTDT), sendo este

um modelo virtual capaz de representar o *status* da máquina real, monitorar e controlar a máquina ferramenta com computação embarcada e inteligente, além de enviar dados do chão de fábrica para Interfaces Homem-Máquina (IHMs) e também para os sistemas que permitam ferramentas eficientes de tomada de decisão em nuvem (LIU *et al.*, 2019).

Em Bordeleaub *et al.* (2019), foi realizado um estudo sobre a utilização de sistemas de conectividade de máquinas-ferramenta por meio de soluções genéricas e dedicadas, observando-se que as soluções genéricas são mais baratas e atendem a maioria dos casos em que o foco é na análise de produção. Porém, para soluções em que o fabricante da máquina está direcionando para a servitização, este custo pode ser diluído se comparado com soluções genéricas em que este modelo de negócio não é sequer possível. O autor também aponta como vantagens a solução dedicada pontos, como melhor performance, dados mais valiosos para o cliente final, melhor entendimento das máquinas por parte do fabricante, além da possibilidade de oferta de serviços mais sofisticados e adaptados.

Na Figura 13 é representado um modelo esquemático de gestão de condição de máquina ferramenta no contexto da Indústria 4.0. A proposta determina uma sequência de trabalho, em que deve ser definido: quais os componentes críticos da máquina devem ser monitorados; quais os tipos de medição são mais adequados utilizando sensores únicos ou múltiplos; cada dado coletado deve ser processado para representar a condição dos componentes da máquina; e os algoritmos determinam, de forma autônoma, quais as melhores práticas de manutenção para o equipamento (LEE *et al.*, 2018).

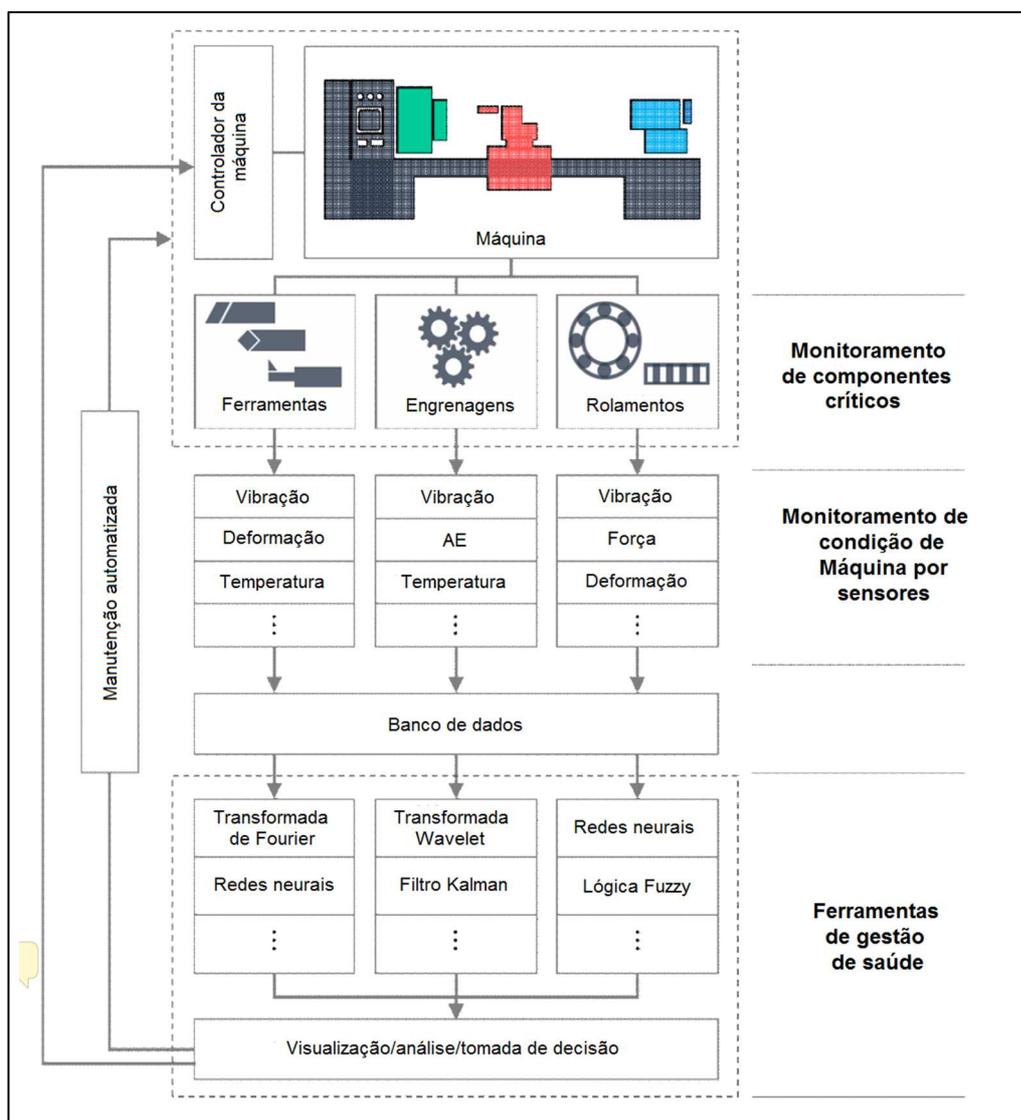


FIGURA 12 – MODELO ESQUEMÁTICO DE GERENCIAMENTO DE CONDIÇÃO DE MÁQUINA INTELIGENTE.

FONTE: (LEE *ET AL.*, 2018)

Inserir a máquina ferramenta no CPS permite que esta tenha sua manutenção baseada na manutenção preditiva (PdM), sendo o método mais eficaz em relação aos demais quanto aos aspectos de menor custo de manutenção, manutenção mais otimizada, maior taxa de disponibilidade de máquina, maior qualidade de fabricação e segurança de máquina (LEE *et al.*, 2019).

Um exemplo dos benefícios da manutenção de máquinas-ferramenta, no contexto da indústria 4.0, pode ser visto em Upasani *et al.* (2017), no qual os

autores apresentam uma arquitetura de CPS que visa conectar diversas máquinas e, por meio de ferramentas de *Machine Learning* interligados a um sistema de coleta de dados em tempo real, promove a gestão da manutenção das máquinas baseada em seus históricos de falhas individuais, coletivos e na demanda de produção. O diagrama deste estudo está representado na Figura 14. Nesse modelo de manutenção distribuída, o agente de manutenção determina o cronograma otimizado de manutenção baseado na condição das máquinas e no cronograma de produção.

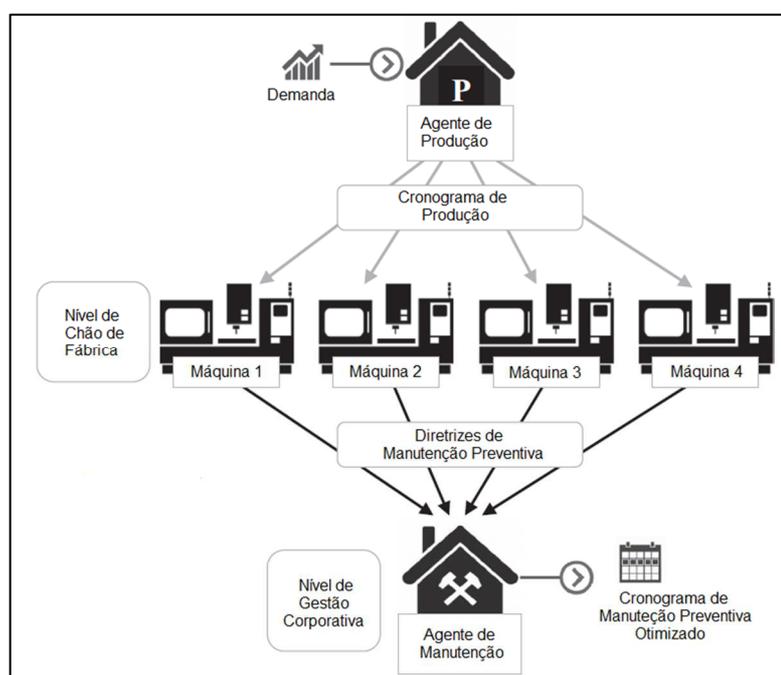


FIGURA 13 – DIAGRAMA DE MANUTENÇÃO DISTRIBUÍDA

FONTE: (UPASANI *ET AL.*, 2017)

Dentre as aplicações encontradas para as tecnologias habilitadoras e as soluções possíveis para os problemas da manufatura, existe um número cada vez maior de estudos, dentre os quais a pesquisa realizada retornou, por exemplo, ao estudo apontando a aplicação de IoT para melhoria da eficiência no consumo de energia para os processos de usinagem em Chen *et al.* (2018).

Outro uso não habitual para o cenário de máquina ferramenta é apresentado em Zhu *et al.* (2019), no qual os autores apontam a realidade aumentada como

sendo uma tecnologia chave para a Indústria 4.0. De acordo com o artigo, é possível um aumento considerável de eficácia nas tomadas de decisão ao utilizar o conceito de *Digital Twin*, sendo neste caso utilizado em uma aplicação de realidade aumentada em centro de usinagem.

As possibilidades são inúmeras, citar algumas aplicações tem como função apenas ilustrar a dimensão do tema, porém o grande desafio deste trabalho é apontar como tornar possível estas aplicações. A padronização da comunicação é um dos requisitos para tornar possíveis estas aplicações.

2.3 PADRÃO DE COMUNICAÇÃO MT CONNECT

A Indústria 4.0 envolve diferentes redes de diversos fabricantes, sendo possível a integração por meio da padronização da comunicação (HENNING *et al.*, 2013). Existe relutância em reinvestir em sistemas que ainda funcionam e em sistemas com protocolos fechados os quais obrigam a aquisição de soluções ofertadas pelo proprietário do protocolo (O'DONOVAN *et al.*, 2015). Existe uma lacuna na padronização dos dados coletados, dificultando a transferência para a nuvem e, conseqüentemente, criando uma barreira entre o mundo físico e digital (GRUBIC, 2014). Padronizar a comunicação é vital para garantir a troca de dados entre máquinas, sistemas e *softwares* por toda a cadeia de valor (FERNÁNDEZ-MIRANDA *et al.*, 2017).

É necessário a utilização de padrões de comunicação universais para a categoria em questão (SCHUH *et al.*, 2017). O protocolo de comunicação OPC UA permite que o dado seja padronizado para cada companhia de forma individual. No entanto, existe o entendimento que é benéfico para alguns ramos da indústria a adoção de padrões unificado exclusivo para aquele ramo (MOSCH, 2017). Muitas vezes os sistemas de manufatura compreendem integração entre sistemas de diferentes fabricantes, estes utilizando comunicação dedicada, variando de máquina para máquina, sendo de vital importância a padronização.

O padrão de comunicação *MT Connect* permite a integração de máquinas-ferramenta com os demais sistemas da manufatura (DENG *et al.*, 2018).

O desenvolvimento de uma pesquisa sobre padronização de dados pode ser verificado em três trabalhos. O padrão de comunicação *MT Connect* demonstra ser viável na aquisição de dados de operação, monitoração e performance de manufatura das máquinas-ferramenta até a nuvem (LIU *et al.*, 2017). No artigo seguinte, a conclusão sobre o estudo apontou um grande potencial no uso do *MT Connect* para inserir máquinas-ferramenta no CPPS, pois unifica diferentes redes e sistemas, permitindo a implementação da inteligência artificial, interações avançadas entre homem e máquina e suporte na tomada de decisão (LIU *et al.*, 2018). O autor finaliza o estudo afirmando que o *MT Connect* é capaz de fazer a comunicação necessária para inserir máquinas-ferramenta no contexto do CPPS. Aponta também a necessidade das máquinas-ferramenta adotarem padrões de comunicação (LIU *et al.*, 2019).

O padrão de comunicação *MT Connect* é anterior ao conceito de Indústria 4.0. A primeira versão foi lançada em dezembro de 2008 (AMT, 2018). O *MT Connect* permite monitorar máquinas-ferramenta e coletar dados de forma precisa e segura, independente de marca e origem (EDRINGTON *et al.*, 2014). O padrão de comunicação *MT Connect* auxilia que o CPPS alcance a nuvem ao fazer a interface entre máquinas-ferramenta (HU *et al.*, 2018). O uso do Padrão *MT Connect* garante, além do compartilhamento de dados, a interoperabilidade dos dados, pois permite que esses estejam no padrão definido para a indústria de máquinas-ferramenta e preparados para a análise de dados (MITTAL *et al.*, 2019).

A Figura 14, extraída do padrão de comunicação *MT Connect*, representa a estrutura básica de implementação (AMT, 2018). Seguem as definições dos componentes coletados no mesmo documento:

- **Equipamento:** qualquer fonte de dado, podendo ser máquinas-ferramenta, sensores, estações de trabalho, *software*, alimentadores de barra e outros;

- **Agent:** *software* que coleta um ou mais equipamentos, organiza o dado de forma estruturada conforme um dicionário pré estabelecido e responde aos pedidos de coleta de dados do *Client*. O *Agent* não precisa ser parte integrante do Equipamento;
- **Client:** *software* que requisita dados dos *Agents* e os processa para dar suporte as operações de manufatura.

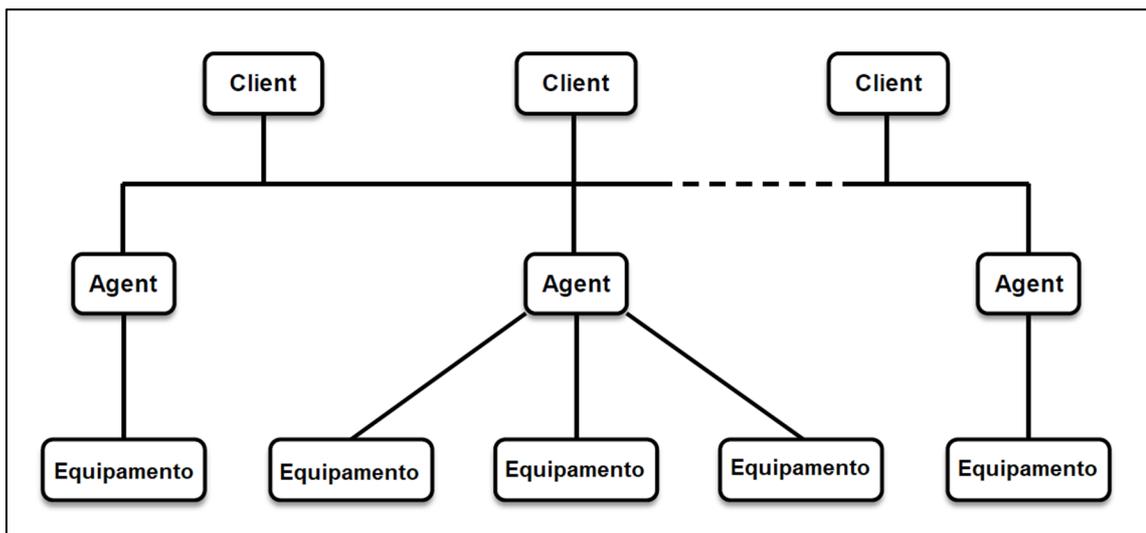


FIGURA 14 – ESTRUTURA DE IMPLEMENTAÇÃO BÁSICA MT CONNECT

FONTE: AMT (2018)

O fluxo dos dados se dá através do *Agent* armazenando dados coletados do Equipamento e mantendo disponível de forma padronizada, o *Client* por sua vez solicita esses dados quando necessário. Como por exemplo um sistema MRP solicitando os dados de produção de um Torno CNC, o MRP não precisa interagir de forma particular com o Torno, ele busca o dado necessário no *Agent*.

A coleta dos dados ocorre por meio de uma estrutura de dados no padrão XML. A Figura 15 demonstra a estrutura de coleta de dados, contendo os atributos *Samples*, *Events* e *Condition* (AMT, 2018). Esses atributos definem como a informação será coletada por cada um dos componentes inseridos no *Agent*, conforme a definição do padrão:

- **Sample:** o dado adota um padrão conforme determinado no documento específico do MT Connect. A resultante deve ser uma grandeza, especificamente em uma unidade de medida padronizada. Por exemplo, para coletar o avanço de um eixo, deve-se utilizar o nome padrão "AXIS_FEEDRATE", o qual deve estar na unidade milímetros por segundo.
- **Event:** o dado adota um padrão conforme determinado no documento específico do MT Connect. A resultante deve ser padronizada conforme o documento que define quais as possíveis resultantes de cada componente. Por exemplo, para coletar o estado de uma placa, deve-se adotar o nome padrão "CHUCK_STATE", o qual deve resultar os nomes padronizados "OPEN", "CLOSED" ou "UNLATCHED".
- **Condition:** o dado deve ter como resultado o valor de saída padronizado com as seguintes opções:
 - *Fault State: Normal, Warning ou Fault;*
 - *Qualifier: High ou Low.*

Este atributo permite que seja coletado o estado de um componente, considerando seu funcionamento na opção *Fault State* ou alguma comparação na opção *Qualifier*.

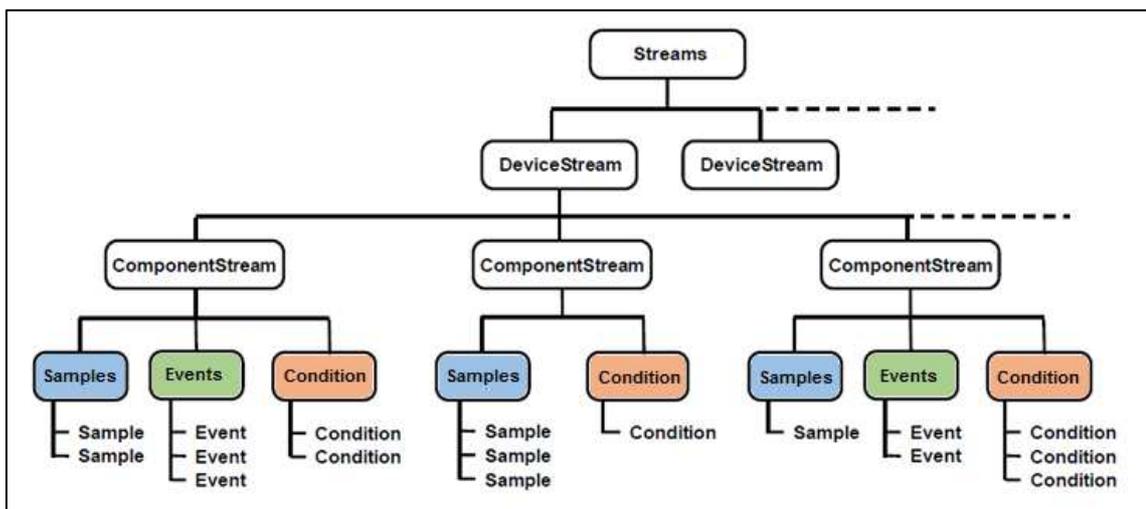


FIGURA 15 – ESTRUTURA DE IMPLEMENTAÇÃO BÁSICA MT CONNECT

FONTE: (AMT, 2018)

Estão disponíveis diversos protocolos de comunicação industrial no mercado, para esta pesquisa foram adotados FOCAS2 e OPC UA, pois estes são os protocolos disponíveis para a coleta dos dados nos CNC's adotados para o estudo, FOCAS2 para CNC Fanuc e OPC UA para CNC Siemens.

FOCAS2 é o nome comercial para o protocolo *Fanuc Open CNC API Specifications 2*, sendo este um protocolo aberto porém de propriedade da empresa Fanuc (OLIVEIRA E ÁLVAREZ, 2016). Este protocolo é responsável por permitir que os dados armazenados na memória do CNC sejam coletados pelo Agent da arquitetura MT Connect (MOHAMMADI et al., 2017)

Gittler *et al.* (2019) acrescenta que o protocolo FOCAS2 permite acessar dados mais detalhados da máquina como avanço e carga dos eixos, além de permitir dados de componentes como temperatura dos servomotores.

O protocolo *OPC Unified Architecture*, conhecido no mercado como OPC UA, foi lançado em 2008 pela *OPC Foundation*, sendo este um protocolo aberto. A norma IEC62541 aponta o protocolo OPC UA como um meio de padronização para a Indústria 4.0, pois esta permite comunicação e método de modelamento de informação, permitindo *Digital Twins* (LIU *et al.*, 2019).

A vantagem da utilização do protocolo OPC UA está na sua ampla utilização e por este ser um protocolo aberto, permitindo desta forma um avanço no índice de maturidade da empresa dentro do contexto da Indústria 4.0 (SCHUH *et al.* 2017).

Para esta aplicação foi determinada a coleta dos dados inclusos no documento de padronização MT Connect, ou seja, o padrão de comunicação foi utilizado para determinar quais os dados devem ser coletados independente da máquina possuir o protocolo FOCAS2 ou OPC UA.

Dentro da estrutura MT Connect apresentada na Figura 14, os protocolos tem a função de conectar os equipamentos com seus respectivos Agents, estes por

sua vez converte os dados para o padrão MT Connect, para que sempre que solicitado por algum Client estejam disponíveis.

3. MATERIAIS E MÉTODO

Este capítulo visa apresentar os materiais (*hardware* e *software*), bem como os métodos utilizados para coleta de dados e posterior análise e discussão dos resultados.

Para garantir que a arquitetura de sistema atenda aos requisitos da Indústria 4.0, é necessário verificar se este se atende as demandas apresentadas na revisão da literatura. Como afirmado em Henning *et al.* (2013), a implementação da CPPS em tempo real exige alta demanda de serviço disponível e grande infraestrutura de rede, em termos de espaço, qualidade técnica e confiabilidade.

Portanto, faz-se necessário medir a integridade e o volume dos dados coletados. No entanto, a velocidade dos dados pode determinar vantagens competitivas, como descrito bem antes da apresentação de Indústria 4.0 no trabalho de Sahay e Ranjan (2008), no qual a tomada de decisão em tempo real demonstra a necessidade de acelerar a velocidade do fluxo de dados, tendo como objetivo gerar vantagem competitiva.

3.1 MATERIAIS

Nesse capítulo será descrito quais os materiais que serão utilizados no desenvolvimento da pesquisa, bem como as características técnicas pertinentes ao contexto desta pesquisa.

As máquinas contidas neste trabalho foram selecionadas pela empresa parceira, seleção essa baseada na viabilidade técnica e demandas de mercado.

3.1.1 CENTRO DE USINAGEM VERTICAL D 1250 V5.0 ROMI

A primeira máquina é o Centro de usinagem vertical equipado com CNC Fanuc 0iF – iHMI, equipamento este que comunica com o sistema de coleta de dados via protocolo proprietário FOCAS2, conforme Figura 16.



FIGURA 16 – CENTRO DE USINAGEM ROMI D1250

FONTE: INDÚSTRIAS ROMI S.A. (A2019)

3.1.2 CENTRO DE USINAGEM HORIZONTAL PH 630 V4.0 ROMI

A segunda máquina é o Centro de usinagem horizontal equipado com CNC Siemens 828D, equipamento este que comunica com o sistema de coleta de dados via protocolo abeto OPC UA, conforme Figura 17.



FIGURA 17 – CENTRO DE USINAGEM ROMI PH 630 V4.0

FONTE: INDÚSTRIAS ROMI S.A. (B2019)

3.1.3 CENTRO DE TORNEAMENTO GL 300 M V4.0 ROMI

A terceira máquina é o Centro de torneamento equipado com CNC Fanuc 0iF – iHMI, equipamento este que comunica com o sistema de coleta de dados via protocolo proprietário FOCAS2, conforme Figura 18.



FIGURA 18 – CENTRO DE TORNEAMENTO ROMI GL 300M

FONTE: INDÚSTRIAS ROMI S.A. (C2019)

3.1.4 CONTROLADOR

O controlador selecionado não pode ser divulgado por razão de confidencialidade da empresa. No entanto, os requisitos adotados para a seleção do mesmo foram:

- a) Capacidade de realizar a função de *Agent* na comunicação com o padrão de comunicação MT Connect;
- b) Capacidade de comunicar nos principais protocolos industriais, dentre eles FOCAS2 e OPC UA;
- c) Capacidade de emular protocolos de comunicação, caso esses não estejam disponíveis pelo fabricante;
- d) Possui 4 *slots* para conexão de cartões, estes cartões permitem a leitura de uma grande variedade de sensores;
- e) Possui *processador real-time* capaz de realizar operações de pré-processamento;
- f) Possui função FPGA, capaz de realizar operações lógicas de forma mais rápida que um microprocessador padrão.

3.2 MÉTODO

Para a definição e validação da arquitetura do sistema, foram definidos os seguintes passos apresentados na Figura 19 e 20.

A Figura 19 apresenta as três etapas da Fase 1. A Etapa 1.1 foi realizada em conjunto com a empresa parceira, para definição de um objetivo com relevância e importância acadêmica, e que estivesse alinhado com as necessidades desta.

Na Etapa 1.2, foram consideradas, além da referência de literatura, as necessidades de mercado e as práticas de mercado por meio de pesquisa, sendo esta de propriedade da empresa, tendo como resultado os seguintes requisitos de projeto:

1- Integrável:

- Integração com sistemas legados;

- Integração Vertical;
- Integração Horizontal.



FIGURA 19 – FASES DO MÉTODO EXPERIMENTAL

FONTE: AUTOR

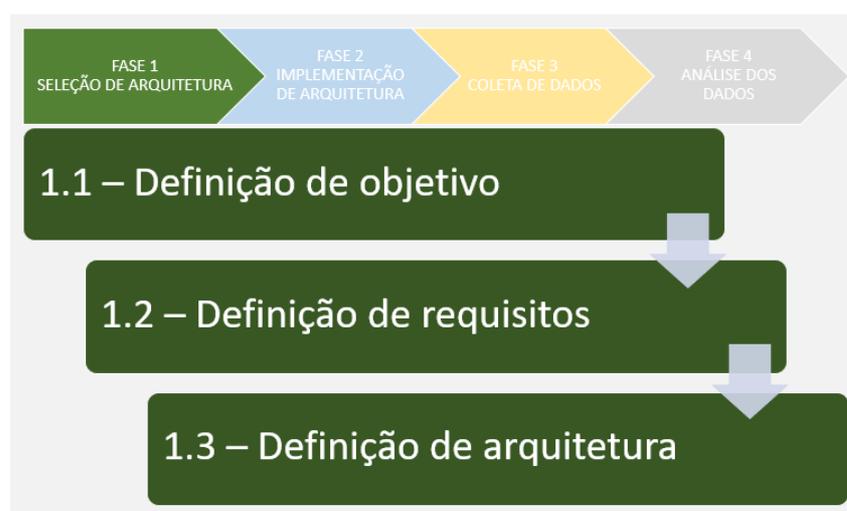


FIGURA 20 – FASE 1: SELEÇÃO DE ARQUITETURA

FONTE: AUTOR

2- Estável:

- Redução de potenciais falhas;
- Recuperação de falhas;
- Sistema seguro.

3- Flexível

- Absorver novas tecnologias.

4- Escalável

- Aumento de escala.

5- Acessível

- Protocolos e Padrões de comunicação abertos.

Na Etapa 1.3, baseada nos requisitos de sistema, foi definida a arquitetura esquemática, conforme Figura 21.

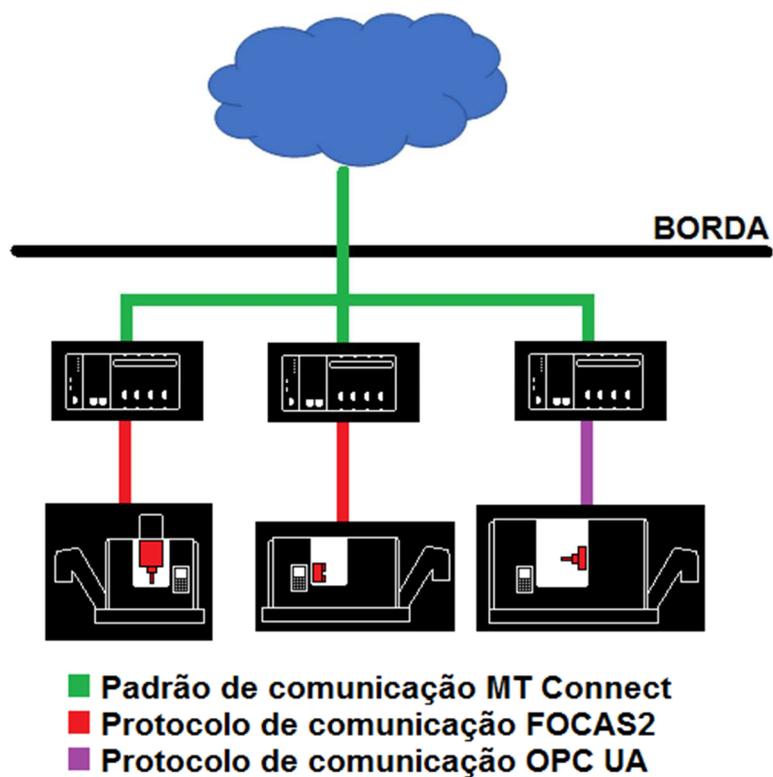


FIGURA 21 – ARQUITETURA EXPERIMENTAL

FONTE: AUTOR

A Figura 22 apresenta as etapas da Fase 2. A Etapa 2.1 foi executada prevendo apenas normas de instalação elétrica, pois o posicionamento dos componentes dentro do painel elétrico será realizado apenas ao final do projeto piloto.



FIGURA 22 – Fase 2: Implementação de arquitetura

FONTE: AUTOR

A Etapa 2.2 tem como objetivo inserir uma versão inicial do projeto de *software*. Este *software* foi alterado de forma significativa até a finalização do projeto piloto e sendo prevista alterações contínuas ao longo de toda a vida do produto.

O *Software* nesse tem como objetivo fazer a coletada dos dados provenientes do CNC nos protocolos FOCAS2 e OPC UA, realizar o pré-processamento e disponibilizar no padrão de comunicação MT Connect. Os dados coletados serão apresentados no Capítulo de Discussão, de forma conceitual, pois são de propriedade da empresa parceira.

A Fase 3, representada pela Figura 23, foi executada em etapa única, tendo como objetivo coletar os dados e enviar para um serviço de nuvem capaz de armazenar os dados e permitir a posterior análise.



FIGURA 23– FASE 3: COLETA DE DADOS

FONTE: AUTOR

Para esta função, foi utilizado serviços de nuvem conforme representado na Figura 24. Por não ser o objetivo do trabalho discutir o serviço de nuvem, este não está detalhado neste capítulo. No entanto, no capítulo Trabalho Experimental, será abordado quais desses serviços foram utilizados para o experimento. Já no capítulo Discussão, será tratado de forma objetiva alguns pontos críticos.

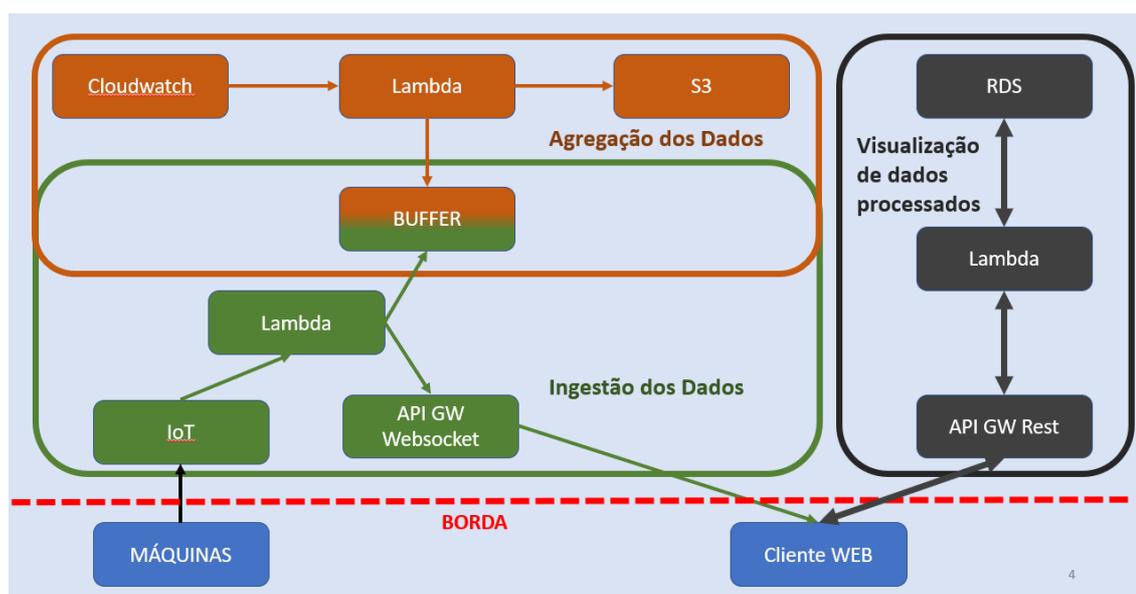


FIGURA 24 – REPRESENTAÇÃO DO SERVIÇO DE NUVEM UTILIZADO

FONTE: AUTOR

A Figura 25 apresenta as etapas da Fase 4, em que na Etapa 4.1 os dados foram analisados para determinar o funcionamento da arquitetura proposta.

A Etapa 4.2 teve como objetivo discutir se os resultados obtidos atendem os aspectos estratégicos e de viabilidade técnica e financeira.

A Etapa 4.3 está baseada na discussão apresentada na etapa anterior. Nela foi preparada uma proposta de alteração de arquitetura, tendo como objetivo otimizar aspectos técnicos, financeiros e estratégicos.

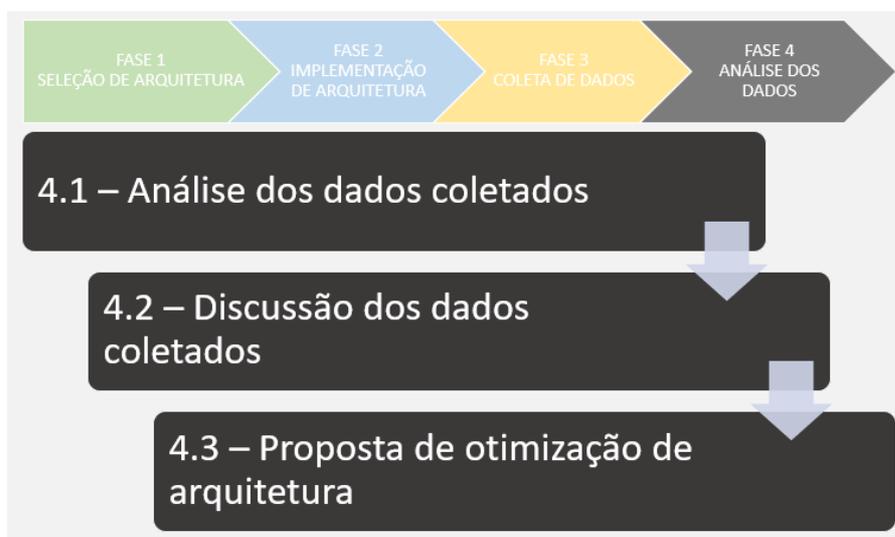


FIGURA 25 – FASE 4: ANÁLISE DOS DADOS

FONTE: AUTOR

3.3 EXPERIMENTOS

Conforme apontado no subtópico 3.2, para validação da arquitetura apresentada, foi necessário realizar experimentos. Os experimentos foram realizados nas dependências da empresa parceira. Este capítulo apresenta, em detalhes, como foram realizados os experimentos. Porém, por questões de confidencialidade, alguns experimentos e resultados não serão apresentados na pesquisa.

Na Fase 2, foi implementada a arquitetura considerando apenas os aspectos necessários para a pesquisa, normas e práticas internas. A fixação em painel e a conexão elétrica não foram consideradas para o experimento.



FIGURA 26– FASE 2 – IMPLEMENTAÇÃO DE ARQUITETURA

FONTE: AUTOR

Os equipamentos da arquitetura foram instalados nas máquinas, conforme as Figura 27 e 28.



FIGURA 27 – INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS NA MÁQUINA – CENTRO DE USINAGEM
FONTE: AUTOR



FIGURA 28 – INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS NA MÁQUINA - TORNO
FONTE: AUTOR

Nessa Fase, foi instalado um *software* para coleta dos dados. Esse *software* foi codificado utilizando outro *software* do fabricante do controlador, sendo sua função realizar a adaptação de cada um dos sinais escolhidos para o padrão de comunicação MT Connect. O código não é apresentado na pesquisa por não ser o foco e por ser de propriedade da empresa parceira. Porém, para a confecção do código, foi realizado os passos apresentados na Figura 29.

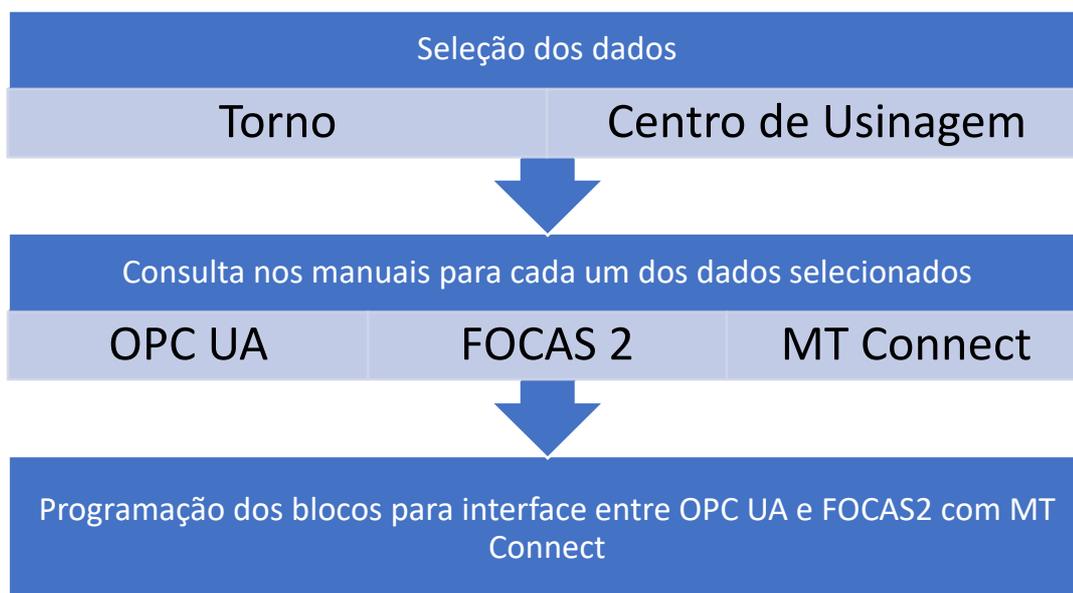


FIGURA 29 – FLUXO DE PROGRAMAÇÃO DO CÓDIGO PARA INTERFACE DE DADOS

FONTE: AUTOR

O projeto visa integrar todos os sinais disponíveis nos protocolos OPC UA, FOCAS2 e no padrão de comunicação MT Connect. A empresa parceira prevê expansão dos sinais disponíveis em MT Connect. Para o teste de viabilidade técnica foi definido um conjunto limitado de dados para coleta, estes divididos em 3 grupos os quais estão sendo coletados por um serviço de nuvem:

1. **Monitoramento de máquina:** dados que indicam o estado da máquina, como exemplo o modo de operação e a porcentagem de avanço, conforme Tabela 2;

2. **Monitoramento de produção:** dados que indicam questões pertinentes a produção da máquina, como exemplo o número de peças usinadas e o tempo de ciclo, conforme Tabela 3;
3. **Monitoramento de componentes e sensores:** dados que indicam aspectos de componentes específicos e sensores, como exemplo a temperatura do eixo árvore e o regime de trabalho do transportador de cavacos, conforme Tabela 4.

TABELA 2 - DADOS SELECIONADOS PARA O EXPERIMENTO - MÁQUINA

	Descrição	Unidade
MÁQUINA	Velocidade do Spindle	RPM
	Velocidade do Spindle	%
	Carga do Spindle	%
	Posição Absoluta Eixo X	mm
	Posição Absoluta Eixo Y/W	mm
	Posição Absoluta Eixo Z	mm
	Chave seletora de avanço	%
	Tempo Lâmpada Indicadora de Status VERDE	s
	Tempo Lâmpada Indicadora de Status AMARELO	s
	Tempo Lâmpada Indicadora de Status VERMELHO	s
	Tempo em operação de corte	s
	Tempo de Execução	s
	Tempo de Máquina Ligada	s
	Tempo de Operação	s
	Usinagens previstas	unidades
	Peças Acabadas	unidades
	Lâmpada Indicadora de Status	Boleano
	Lâmpada Indicadora de Status	Boleano
	Lâmpada Indicadora de Status	Boleano

FONTE: AUTOR

TABELA 3 - DADOS SELECIONADOS PARA O EXPERIMENTO – PRODUÇÃO

	Descrição	Unidade
PRODUÇÃO	Turno de trabalho	h
	Almoço/Jantar/Troca turno (h)	min
	Tempo disponível - Tempo de parada planejadas	h
	Tempo planejado de produção - tempo de equipamento parado	h
	Manutenção Corretiva	Boleano
	Manutenção Preditiva	Boleano
	Manutenção Preventiva	Boleano
	Modo Preparação (SETUP)	Boleano
	Ausência Operador	Boleano
	Falta Matéria Prima	Boleano
	Máquina Desligada	Boleano
	Máquina Emergência	Boleano
	Tempo padrão ciclo de peça	min
	Quantidade de peças produzidas	unidades
	Tempo planejado de produção - tempo de equipamento parado	h
	Peças produzidas	unidades
	Peças ruins	unidades

FONTE: AUTOR

TABELA 4 - DADOS SELECIONADOS PARA O EXPERIMENTO – COMPONENTES E SENSORES

	Descrição	Unidade
COMPONENTES E SENSORES	Dados de Eixo Árvore	variados
	Dados de Ferramenta Ativa	variados
	Dados de Torre	variados
	Dados das Portas de Acesso	variados
	Dados de Dispositivos Periféricos	variados
	Dados de Unidade Hidráulica	variados
	Dados de Lubrificação	variados
	Dados de Transportador de Cavacos	variados
	Dados de Refrigeração	variados
	Dados de Placa	variados
	Dados de Contra Ponto	variados
	Dados de Preset de Ferramenta	variados
	Dados de Sistema de Controle de Torque	variados
	Dados de Gama de Cabeçote	variados
	Dados de Magazine	variados
	Dados de Movimentação dos Eixos	variados
	Dados de Eixos Rotativos	variados
	Dados de Elementos Pneumáticos	variados
	Dados de Pallet	variados
	Dados de Dispositivos de Fixação de Peça	variados

FONTE: AUTOR

Questões envolvendo métodos de conexão, *Cyber Security*, métodos de armazenamento dos dados e outras questões inerentes ao projeto foram avaliadas. No entanto, não serão abordadas nesta pesquisa.

Na Fase 3, foi realizada a coleta dos dados, conforme detalhado a seguir.



FIGURA 30 – FASE 3: COLETA DE DADOS

FONTE: AUTOR

A proposta desta pesquisa tem como objetivo inserir máquinas-ferramenta no CPPS, ou seja, deve prever até o *Agent* – MT Connect na arquitetura. No entanto, a interação com o *Client* – MT Connect pode determinar a viabilidade do projeto, conforme apresentado mais detalhadamente no capítulo Discussões. Portanto, se faz necessário um breve entendimento do *Client* – MT Connect utilizado para o experimento. Na Figura 31, está apresentado a arquitetura de serviços de nuvem utilizados para o experimento. Esses serviços foram divididos nas áreas de ingestão, agregação e visualização dos dados. Por ser um projeto que ainda não foi divulgado pela empresa parceira, o provedor de serviço utilizado foi mantido em sigilo. O nome dos serviços da arquitetura em nuvem será aqui representado por sua função e não por seu nome comercial.

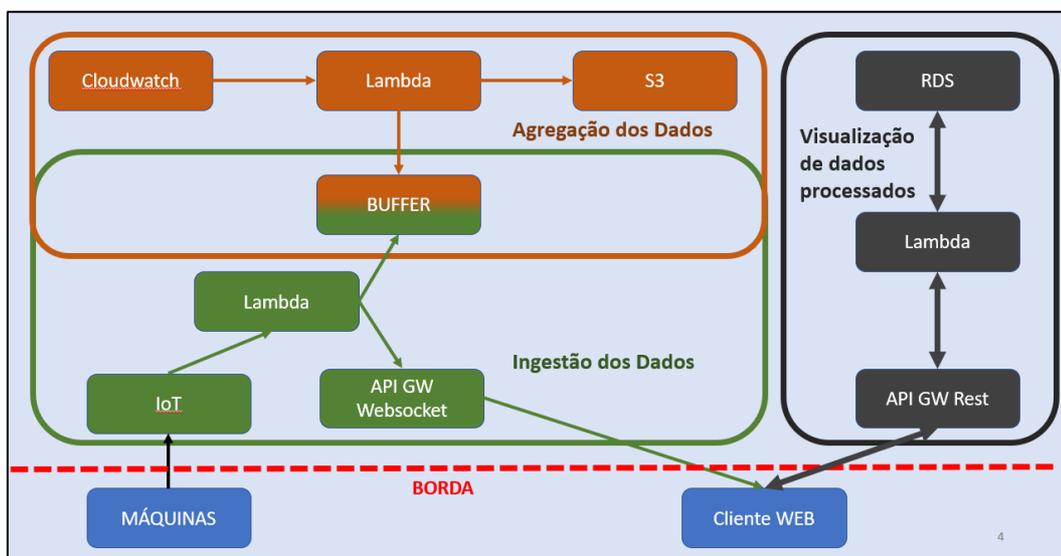


FIGURA 31 – REPRESENTAÇÃO DO SERVIÇO DE NUVEM UTILIZADO

FONTE: AUTOR

A Figura 32 mostra mais detalhadamente os serviços utilizados para a ingestão dos dados.

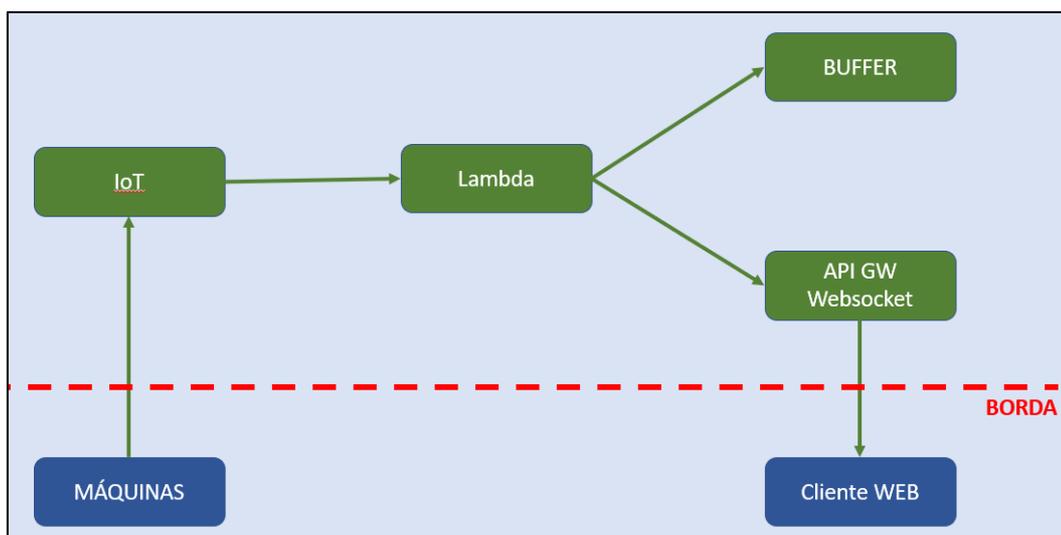


FIGURA 32 – REPRESENTAÇÃO DA INGESTÃO DE DADOS

FONTE: AUTOR

- **IoT:** utilizado para conectar via MQTT os *Agent's* com a nuvem contratada;
- **Lambda:** utilizado para executar códigos por demanda. Estes códigos podem ser executados com frequência pré-determinada ou de acordo com solicitação do sistema;
- **Buffer:** função de executar instâncias containerizadas, ou seja, permite a execução de elementos de código de forma compartimentada;
- **API GW Websocket:** realiza a conexão da nuvem com clientes WEB por pacotes de mensagem em tempo real.

A Figura 33 mostra detalhadamente os serviços utilizados para a agregação dos dados.

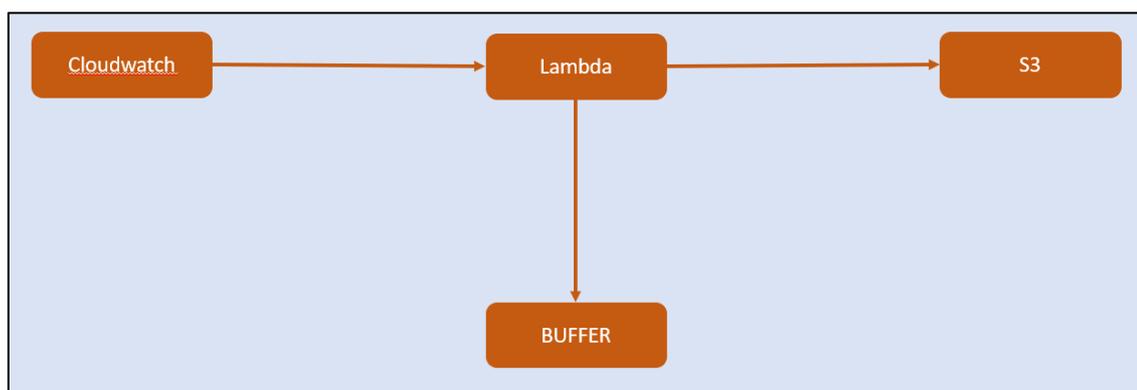


FIGURA 33 – REPRESENTAÇÃO DA AGREGAÇÃO DE DADOS

FONTE: AUTOR

- **Cloudwatch:** utilizado para monitorar o funcionamento do sistema;
- **Lambda:** utilizado para executar códigos por demanda. Esses códigos podem ser executados com frequência pré-determinada ou de acordo com solicitação do sistema;
- **Buffer:** utilizado para realizar o armazenamento dos dados coletados. Esse armazenamento pode ser realizado em diferentes classes as quais determinam qual a velocidade os dados serão recuperados do armazenamento;
- **S3:** função de executar instâncias containerizadas, ou seja, permite a execução dos elementos de código de forma compartimentada.

A Figura 34 mostra mais detalhadamente os serviços utilizados para a visualização dos dados.

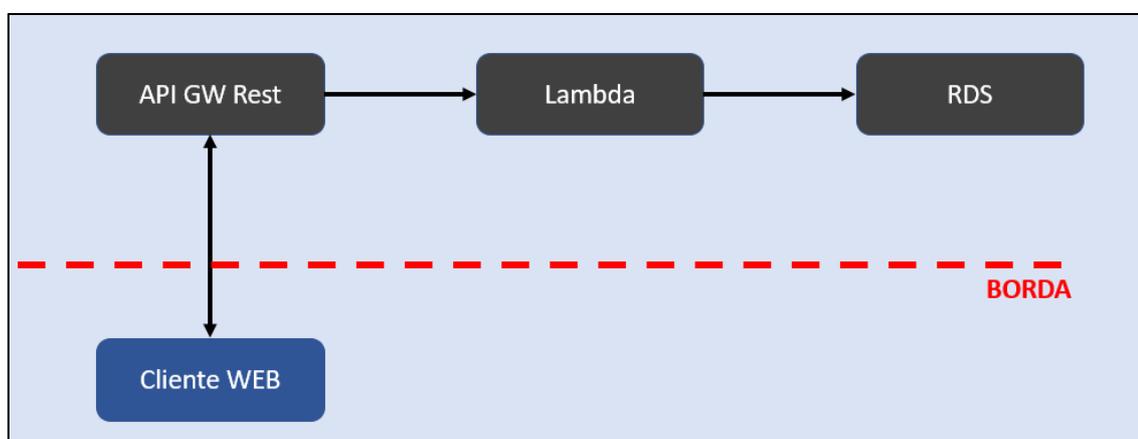


FIGURA 34 – REPRESENTAÇÃO DA VISUALIZAÇÃO DE DADOS

FONTE: AUTOR

- **API GW Rest:** realiza a comunicação bidirecional em tempo real. Além disso, realiza outras funções, como o controle de acesso e o gerenciamento de tráfego;
- **Lambda:** utilizado para executar códigos por demanda. Esses códigos podem ser executados com frequência pré-determinada ou de acordo com solicitação do sistema;

- **RDS**: banco de dados relacional escalável em nuvem.

A Figura 35 apresenta as etapas da Fase 4, em que na Etapa 4.1 os dados foram analisados para apresentar aos envolvidos no projeto e os resultados obtidos a partir da implementação da arquitetura proposta. Foram analisados os seguintes aspectos técnicos:

- Estabilidade;
- Integridade dos dados;
- Velocidade de coleta dos dados.

Os dados coletados são de integral propriedade da empresa parceira, os quais não foram disponibilizados. No entanto, foi autorizado apontar qual a método utilizado para a análise dos dados.

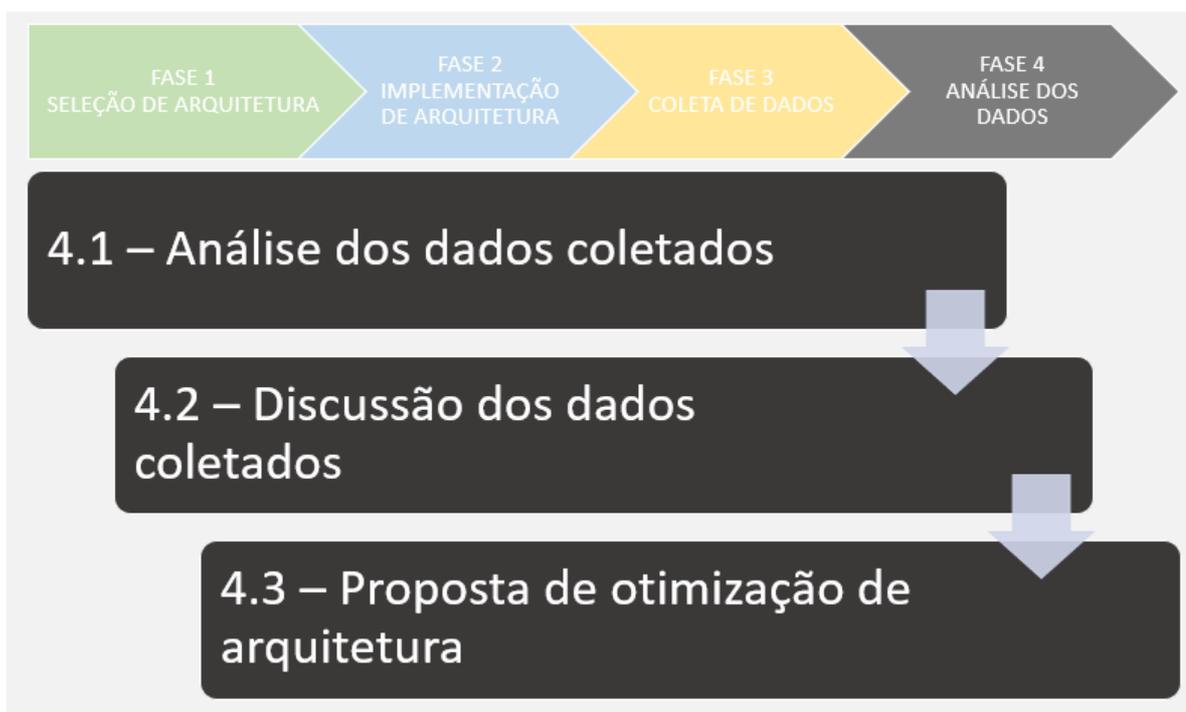


FIGURA 35 – FASE 4: ANÁLISE DOS DADOS

FONTE: AUTOR

a) Estabilidade:

- Verificada a disponibilidade do sistema para coleta de dados, nas frequências de 1 e 10 segundos;
- Verificado o restabelecimento do sistema de forma autônoma após desligamento.

b) Integridade dos dados:

- Realizada comparação entre dados coletados pelo controlador e os dados armazenados em nuvem;
- Realizada comparação entre dados em nuvem e dados apresentados no CNC das máquinas.

c) Velocidade de coleta dos dados:

- Feito registro do momento da solicitação do dado partindo da nuvem e do momento de retorno do dado, armazenamento resultante da diferença entre os dois momentos. Utilizando o *software* Minitab, foi verificado que a distribuição do tempo de resposta se mostrou Normal e com baixa variância. Portanto, foi considerado o valor médio.

Os experimentos foram realizados em ambiente controlado e com baixa amostragem. Com isso, não possuem valores estatísticos. Futuramente serão realizados testes de maior escala em outras áreas da empresa e em empresas parceiras.

As Etapas 4.2 e 4.3 estão demonstradas no capítulo Resultados e Discussão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A arquitetura de comunicação para máquinas-ferramenta no contexto de CPPS foi aplicada em uma empresa de manufatura. Essa empresa possui em seu escopo de negócios a fabricação de máquinas-ferramenta. O objetivo foi avaliar e aprimorar a proposta de arquitetura de comunicação.

Neste capítulo, serão apresentados e analisados os resultados obtidos na pesquisa.

4.1 VALIDAÇÃO DA ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO

O objetivo geral da pesquisa previa o desenvolvimento de uma arquitetura de comunicação capaz de integrar máquinas-ferramenta no contexto de CPPS. Para determinar se a arquitetura proposta atende os requisitos definidos, é necessário verificar se estes foram atendidos.

Após a revisão de literatura e definição de modelo de negócio da empresa parceira, foram definidos os seguintes requisitos para a arquitetura:

1- Integrável:

- Integração com sistemas legados;
- Integração Vertical;
- Integração Horizontal.

2- Estável:

- Redução de potenciais falhas;
- Recuperação de falhas;
- Sistema seguro.

3- Flexível

- Absorver novas tecnologias.

4- Escalável

- Aumento de escala.

5- Acessível

- Protocolos e Padrões de comunicação abertos;
- Aberto para comunicação entre redes.

4.1.1 INTEGRÁVEL

A importância da integração com sistemas legados cresceu ao longo da pesquisa, pois foi feito um estudo estatístico utilizando a base de dados da empresa parceira, a qual considerou as máquinas vendidas entre janeiro de 2000 e setembro de 2018. O conteúdo do estudo é confidencial e não pode ser divulgado. No entanto, os resultados apontam para uma oportunidade de negócio maior, comparado com a projetada inicialmente.

Foram verificadas algumas possibilidades de integração com sistemas legados:

- Através de *hardware* dedicado de coleta de dados por entradas digitais;
- Através de *hardware* comercial adaptado para coleta de dados por entradas digitais;
- Através de módulo de entradas digitais acoplado ao controlador.

A arquitetura se mostrou apta a integrar máquinas legadas na arquitetura proposta ao inserir módulo digital de entrada no controlador. Porém, estudos preliminares apontam inviabilidade financeira nesse tipo de solução.

As integrações Vertical e Horizontal são atendidas pela arquitetura proposta ao considerar a adoção do padrão de comunicação MT Connect, o qual é capaz de fazer a interface com os sistemas mais novos. Sistemas legados precisarão ser adaptados para essa função. Porém, essa é uma prática comum de mercado.

4.1.2 ESTÁVEL

Foi identificado, ao longo da pesquisa, que nas soluções apresentadas pelo mercado, existe uma relação direta entre o nível de segurança e o custo para

projetos em nuvem, muitas vezes tornando o projeto inviável financeiramente. Se faz necessário aprofundar os estudos nessa área do projeto, pois requer um conhecimento específico do assunto.

No entendimento da equipe de projeto, até que mais estudos sejam realizados, entende-se que a redução de potenciais falhas, recuperação de falhas e sistema seguro devem ser objetivos para que os desenvolvedores de *software* adotem ao longo do projeto e discutem com os demais envolvidos a viabilidade técnica e financeira.

Considerando o método proposto, os testes de estabilidade atenderam todas as expectativas iniciais.

Não houve ocorrência de sistema indisponível ao longo do experimento realizado no período de 30 dias para o teste de disponibilidade do sistema e para coleta de dados em frequência pré-determinada. O teste de restabelecimento do sistema, de forma autônoma após desligamento, foi satisfatório, não havendo ocorrência de não restabelecimento do sistema.

4.1.3 FLEXÍVEL

Considera a capacidade da arquitetura de absorver novas tecnologias. Para tanto, foi utilizado um controlador que possui suporte nativo aos principais protocolos de comunicação industrial, aproximadamente 20. Caso necessário, o controlador possui *Field Programmable Gate Array* (FPGA) capaz de emular um protocolo não suportado, sendo possível desta forma desenvolver qualquer protocolo aberto. Não foram testados todos os protocolos disponíveis, no entanto, foi considerado o requisito como atendido pois atende qualquer protocolo mencionado na literatura estudada.

4.1.4 ESCALÁVEL

Se refere a capacidade do sistema crescer sua escala, sem que ocorram alterações de arquitetura. Portanto, a arquitetura atende a adoção do padrão MT Connect, este não limitado ao número de máquinas conectadas.

Nos testes realizados, a coleta dos dados respeitou estrutura pré-determinada pelo padrão de comunicação, permitindo que o dado seja estratificado individualmente quando recuperado do banco de dados.

A arquitetura de nuvem não é objeto de estudo. No entanto, por estar diretamente relacionada a pesquisa, se faz relevante informar que a mesma também se mostrou escalável. Para tanto, foram adotadas ferramentas em nuvem com característica escalável para volume de tráfego e armazenamento de dados, bem como ferramentas de processamento e troca de mensagens por demanda.

4.1.5 ACESSÍVEL

Dentro da proposta inicial de conectar máquinas-ferramenta com os atuais CNC's Siemens e Fanuc, estes permitem comunicação via protocolo OPC UA e FOCAS2, respectivamente. OPC UA é um padrão de comunicação aberto. Já o FOCAS2 não é considerado um protocolo aberto, pois é de propriedade FANUC. No entanto, ao ser interpretado e convertido para o padrão de comunicação MT Connect, passa a ter uma interface de comunicação considerada aberta, assim como OPC UA. Portanto, para o CPPS, a máquina estará apta a se comunicar em padrão de comunicação aberto, permitindo desta forma total integração e acesso.

4.2 PROPOSTA DE MELHORIA DA ARQUITETURA

Uma vez verificado que a arquitetura é capaz de atender aos requisitos estabelecidos na proposta, iniciou-se o processo de otimização da performance da arquitetura. Foi identificado as seguintes oportunidades de otimização:

- Criação de elementos com atributo tipo *Condition*;
- Pré-processamento de dados;
- Frequência de coleta de dados;
- Otimizar classe de armazenamento de dados;
- Estimular boas práticas na coleta dos dados.

4.2.1 CRIAÇÃO DE ELEMENTOS COM ATRIBUTO TIPO CONDITION

Conforme apresentado na Figura 36, é necessário definir o atributo de cada dado coletado, dentre as opções *Event*, *Condition* e *Sample*. Essa definição deve obedecer o manual MT Connect.

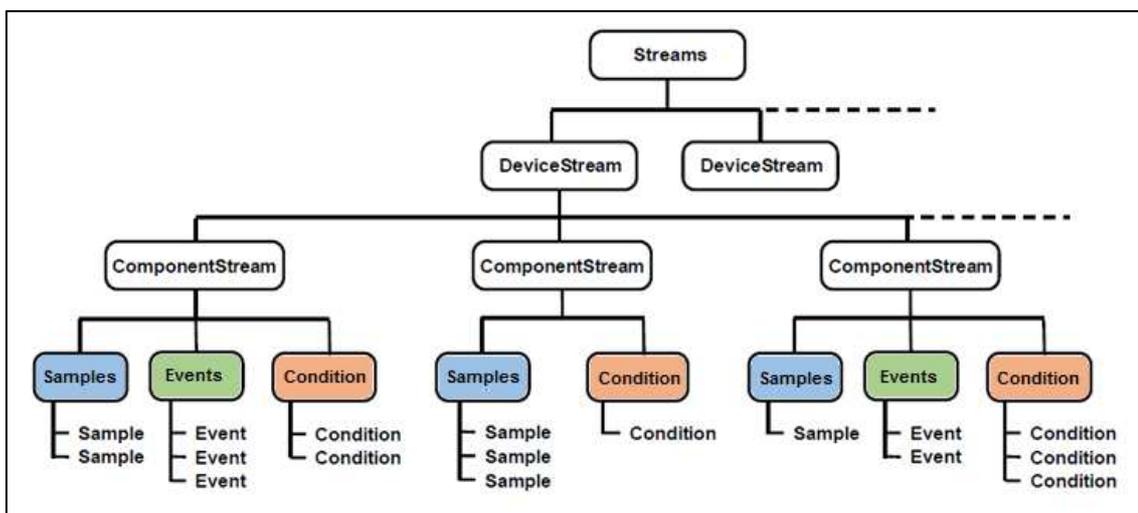


FIGURA 36 – ESTRUTURA DE IMPLEMENTAÇÃO BÁSICA MT CONNECT

FONTE: AMT (2018)

Para otimizar o uso de dados, é possível criar na interface MT Connect dados adicionais do tipo *Condition*, os quais já realizam alguma comparação necessária para o sistema, permitindo que esteja disponível um dado tratado e padronizado. Este tipo de solução permite diminuir o fluxo de dados e execução de ferramentas por demanda em nuvem, trazendo melhor performance do sistema e diminuição de custo.

Por exemplo, para coletar a posição da chave de avanço, é preciso ler no padrão MT Connect o elemento “AxisFeedrateOverride”. Para cada um dos eixos, o valor estará em porcentagem e será lido de uma variável do tipo “*floating-point number*”. Esta interface, assim como todas as outras disponíveis na máquina e existentes no padrão, precisam ser feitas (AMT, 2018).

Porém, caso o fabricante determine que para um *dashboard* seja comercializado, ele precisa apenas indicar se um dos eixos de um centro de usinagem está com valores abaixo de 100%. É possível criar um elemento do tipo *Condition*, o qual compara, de forma local, a posição da chave para os três eixos e disponibiliza um sinal do tipo booleano, representando apenas *High* ou *Low*.

Usando essa solução, é possível reduzir o tráfego de dados de 12 *bytes* para apenas 1 *byte*, ou seja, o tráfego de dados reduziria em 95 vezes para o exemplo. Outra vantagem é a redução de cálculo em nuvem, o qual tem custo enquanto no controlador local não.

4.2.2 PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS

Dados de sensores adicionais instalados pelo fabricante da máquina não precisam estar disponíveis para terceiros. Por exemplo, um sensor de temperatura instalado no eixo árvore, tendo como objetivo fazer monitoramento para a manutenção preditiva.

Para um uso racional dos recursos, é importante entender a relação entre custo e valor do dado, conforme a Figura 37. A figura original não apresenta o custo, pois considera apenas o valor que o dado ganha ao avançar pelas etapas informação, conhecimento e contexto.

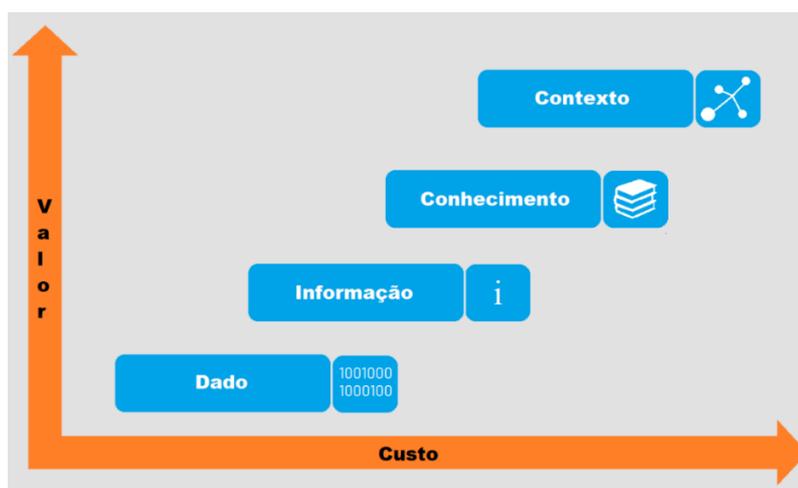


FIGURA 37 – RELAÇÃO ENTRE VALOR E CUSTO DO DADO EM NUVEM

FONTE: ADAPTADO DE EMMANOUILIDIS *ET AL.* (2019)

No entanto, foi verificado que ao utilizar serviços em nuvem, esse ganho de valor acontece a partir das operações com ferramentas em nuvem, as quais possuem custo.

Considerando essa relação entre valor e custo do dado em nuvem, surge a proposta de discutir individualmente cada um desses dados, com o objetivo de não atribuir mais valor que o necessário. Ou seja, é necessário otimizar o envio de dados chamados de crus. No entanto, considera a potencial perda de valor do mesmo.

A determinação do pré-processamento dos dados deve partir do potencial valor de forma individualizada. Na Figura 38 está representado um estudo com três opções de pré-processamento de dados de temperatura para a preditiva do eixo árvore.

CAMADA	Dado	Informação	Conhecimento	Contexto
EFEITO	Dado individual	Métrica/ Definições	Decisão	Otimização
OPÇÃO 1	ID008, PT100 1, D67800=0,0987, 2018: 7:23:15:05	Eixo árvore do Torno 8 apresentou 47°C às 2018 7:23:15:05	Eixo árvore apresenta problema de sobreaquecimento em altas rotações , necessário verificar em até uma semana. *Pode utilizar outras informações transformadas de acelerômetro do eixo árvore.	Torno 8 apresenta perda de performance e deve ser reparado em até 1 semana. Considerando o MRP e sistema da manutenção, a parada para manutenção deve ocorrer em 2 dias no terceiro turno.
OPÇÃO 2	ID008, PT100 1, D67800=0,0987, 2018: 7:23:15:05	Eixo árvore do Torno 8 apresentou 47°C às 2018 7:23:15:05	Eixo árvore apresenta problema de sobreaquecimento em altas rotações , necessário verificar em até uma semana. *Pode utilizar outras informações transformadas de acelerômetro do eixo árvore.	Torno 8 com sobre temperatura, sendo necessário verificar em até uma semana.
OPÇÃO 3	ID008, PT100 1, D67800=0,0987, 2018: 7:23:15:05	Torno 8 com sobre temperatura às 2018 7:23:15:05	Torno 8 está com sobre temperatura , acionar manutenção para avaliação	Torno 8 com sobre temperatura, potencial impacto na produção.

FIGURA 38 – PROPOSTA DE DISCUSSÃO DO VALOR DO DADO DE TEMPERATURA PARA PREDITIVA DO EIXO ÁRVORE

FONTE: AUTOR

A linha amarela representa a camada de valorização do dado. Já a linha verde representa o efeito da camada. Os blocos azuis representam os dados crus. A medida que o dado ganha valor, o bloco fica mais escuro.

Na opção 1, o dado cru coletado foi convertido para valor em temperatura na camada de Informação. Na camada de Conhecimento, foi implementado um algoritmo para determinar qual a implicação daquela temperatura coletada na máquina. Na camada de Contexto, foi possível cruzar essas informações com outros algoritmos, tendo como o objetivo determinar o melhor momento para executar a manutenção necessária.

Na opção 2, na camada de Contexto, não foi feito o cruzamento de informações com outros algoritmos. Como consequência, o dado não ganhou mais valor e se limitou a determinar qual seria a data limite para a manutenção.

Na opção 3, na camada de Informação, não houve transformação do dado em valor de temperatura. Como consequência, o dado se limita a indicar que existe um aumento de temperatura, sendo necessário acionar a manutenção para avaliação.

Em qualquer uma das opções, o sistema fornece mais informação que um sistema sem qualquer tipo de monitoramento. O nível de valor de cada um dos dados deve ser determinado de acordo com o modelo de negócio adotado pela empresa.

4.2.3 FREQUÊNCIA DE COLETA DE DADOS

Conforme apontado na arquitetura de nuvem, existe um custo cada vez maior quando o sistema solicita coleta de dados. Na solução de nuvem adotada por exemplo, cada execução do serviço de Lambda permite a coleta de 128Mb com duração de 100ms, ou seja, caso seja coletado um volume pequeno de dados a execução será, em sua maioria, desperdiçada. Outros custos de serviço em nuvem são computados a cada coleta de dados de forma unitária.

Portanto, se faz necessário otimizar a frequência de coleta dos dados. Em uma aplicação do tipo *dashboard*, pode ser oferecido alguma indicação em tempo real. Porém, na prática, essa indicação ocorre em uma frequência a qual deve atender as necessidades dos clientes, seja viável tecnicamente e financeiramente.

Determinar quais dados não precisam ser monitorados em tempo real e enviá-los em pacotes diários ou por turno, permite um uso mais otimizado do sistema, pois leva à melhor performance das demais operações e menor custo operacional.

4.2.4 OTIMIZAR CLASSE DE ARMAZENAMENTO DE DADOS

O serviço de armazenamento de dados em nuvem oferece diferentes classes de armazenamento dos dados, em que a principal diferença diz respeito ao tempo necessário para acesso dos dados.

Para garantir a viabilidade financeira do sistema, é importante determinar quais serviços serão oferecidos a cada cliente interno ou externo e, a partir dessa determinação, definir qual o tempo de resposta para a leitura dos dados.

4.2.5 ESTIMULAR BOAS PRÁTICAS NA COLETA DOS DADOS

Esta pesquisa não tem como objetivo trabalhar os dados coletados. No entanto, como esses dados serão trabalhados, os mesmos influenciam diretamente a viabilidade do projeto. Portanto, se faz necessário disponibilizar dados limpos e bem estruturados, desde o início do projeto.

Limpar dados com falhas é uma parte crítica da análise de dados. Com frequência, consome aproximadamente 80% do tempo total para a análise dos dados (COX, 2004).

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho apresentou conforme o objetivo, uma proposta de arquitetura de comunicação para máquinas-ferramenta no contexto de CPPS.

Com o método apresentado, foi possível validar o funcionamento da arquitetura de comunicação proposta, bem como propor melhoria da arquitetura. A arquitetura se mostrou viável e funcional dentro do contexto e limitações apresentadas.

O método utilizado adotou conceitos teóricos e aplicação prática dos mesmos, contribuindo desta forma com a validação do modelo teórico, bem como permitindo a utilização desta arquitetura para novas pesquisas e aplicações.

Esse processo de otimização da arquitetura deve ser constante, conforme verificado no referencial teórico. Existe uma constante evolução das tecnologias e surgimento de novos modelos de negócio. Otimizar a arquitetura pode ir além da garantia de viabilidade do sistema, permitindo alcançar vantagens competitivas ao oferecer menores custos ou novas funcionalidades.

Como sugestão para continuidade desta pesquisa e pesquisas futuras, indica-se:

- a) Estudar a integração vertical e horizontal dos dados coletados, tendo como objetivo otimizar a arquitetura;
- b) Realizar testes para verificar os ganhos com as propostas de otimização de arquitetura;
- c) Aprofundar estudo para integração de máquinas legadas na arquitetura, considerando viabilidade financeira;
- d) Estudar segurança do sistema;
- e) Realizar testes com maior amostragem, prevendo diferentes condições de infraestrutura de rede.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERS, A. et al. 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**, v. 52, p. 262–267, 2016.

ALELYANI, T. et al. A literature review on obsolescence management in COTS-centric cyber physical systems. **Procedia Computer Science**, v. 153, p. 135–145, 2019.

AMT - THE ASSOCIATION FOR MANUFACTURING TECHNOLOGY. MTConnect Standard Part 1.0 - Overview and Fundamentals. 2018a.

AMT - THE ASSOCIATION FOR MANUFACTURING TECHNOLOGY. MTConnect Standard Part 3.0 – Streams Information Model. 2018b.

BAGHERI, B. et al. Cyber-physical systems architecture for self-aware machines in industry 4.0 environment. **IFAC-PapersOnLine**, v. 28, n. 3, p. 1622–1627, 2015a.

BAGHERI, B. et al. Cyber-physical systems architecture for self-aware machines in industry 4.0 environment. **IFAC-PapersOnLine**, v. 28, n. 3, p. 1622–1627, 2015b.

BERGER, C. et al. Approach for an event-driven production control for cyber-physical production systems. **Procedia CIRP**, v. 79, p. 349–354, 2019.

CHEN, X. et al. An Internet of Things based energy efficiency monitoring and management system for machining workshop. **Journal of Cleaner Production**, v. 199, p. 957–968, 2018.

CORREA, J. E.; TORO, R.; FERREIRA, P. M. A new paradigm for organizing networks of computer numerical control manufacturing resources in cloud manufacturing. **Procedia Manufacturing**, v. 26, p. 1318–1329, 2018.

COX, N. J. **Exploratory Data Mining and Data Cleaning**. [s.l: s.n.]. v. 11

DENG, C. et al. From Open CNC Systems to Cyber-Physical Machine Tools: A Case Study. **Procedia CIRP**, v. 72, p. 1270–1276, 2018.

EDRINGTON, B. et al. Machine monitoring system based on MTConnect technology. **Procedia CIRP**, v. 22, n. 1, p. 92–97, 2014.

EMMANOUILIDIS, C. et al. Enabling the human in the loop: Linked data and knowledge in industrial cyber-physical systems. **Annual Reviews in Control**, v. 47, p. 249–265, 2019.

FERNÁNDEZ-MIRANDA, S. S. et al. The challenge of integrating Industry 4.0 in the degree of Mechanical Engineering. **Procedia Manufacturing**, v. 13, p. 1229–1236, 2017a.

FERNÁNDEZ-MIRANDA, S. S. et al. The challenge of integrating Industry 4.0 in the degree of Mechanical Engineering. **Procedia Manufacturing**, v. 13, p. 1229–1236, 2017b.

GITTLER, T. et al. A fundamental approach for data acquisition on machine tools as enabler for analytical Industrie 4.0 applications. **Procedia CIRP**, v. 79, p. 586–591, 2019.

GRUBIC, T. Servitization and remote monitoring technology: A literature review and research agenda. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 25, n. 1, p. 100–124, 2014a.

GRUBIC, T. Servitization and remote monitoring technology. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 25, n. 1, p. 100–124, 2014b.

HADDARA, M.; ELRAGAL, A. The Readiness of ERP Systems for the Factory of the Future. **Procedia Computer Science**, v. 64, p. 721–728, 2015.

HENNING, KAGERMANN(NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE AND ENGINEERING). WOLFGANG, WAHLSTER (GERMAN RESEARCH CENTER FOR ARTIFICIAL INTELLIGENCE). JOHANNES, H. (DEUTSCHE P. A. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. **Final report of the Industrie 4.0 WG**, n. April, p. 82, 2013.

HU, L. et al. Modeling of Cloud-Based Digital Twins for Smart Manufacturing with MT Connect. **Procedia Manufacturing**, v. 26, p. 1193–1203, 2018.

IRIARTE, I. et al. Service design visualization tools for supporting servitization in a machine tool manufacturer. **Industrial Marketing Management**, v. 71, n. November 2017, p. 189–202, 2018.

KAGERMANN HENNING, A. R.; GAUSEMEIER JÜRGEN, S. G.; WAHLSTER WOLFGANG. Industrie 4.0 in global context. **acatech STUDY**, 2016.

KUMAR, A.; CHINNAM, R. B.; TSENG, F. An HMM and polynomial regression based approach for remaining useful life and health state estimation of cutting tools. **Computers and Industrial Engineering**, n. xxxx, p. 0–1, 2018.

KUMAR, A.; CHINNAM, R. B.; TSENG, F. An HMM and polynomial regression based approach for remaining useful life and health state estimation of cutting tools. **Computers and Industrial Engineering**, v. 128, n. xxxx, p. 1008–1014, 2019.

LEE, G. Y. et al. Machine health management in smart factory: A review. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 32, n. 3, p. 987–1009, 2018a.

- LEE, G. Y. et al. **Machine health management in smart factory: A review.** [s.l.: s.n.]. v. 32
- LEE, J.; KAO, H. A.; YANG, S. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. **Procedia CIRP**, v. 16, p. 3–8, 2014.
- LEE, W. J. et al. Predictive maintenance of machine tool systems using artificial intelligence techniques applied to machine condition data. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 506–511, 2019.
- LEGAULT, P. et al. Servitization trend in the machine-tools market: Comparing value from turnkey and specialized IoT-based analytics solutions using TOPSIS. **Procedia Manufacturing**, v. 31, p. 390–397, 2019a.
- LEGAULT, P. et al. Servitization trend in the machine-tools market: Comparing value from turnkey and specialized IoT-based analytics solutions using TOPSIS. **Procedia Manufacturing**, v. 31, p. 390–397, 2019b.
- LIU, C. et al. MTConnect-based Cyber-Physical Machine Tool: A case study. **Procedia CIRP**, v. 72, p. 492–497, 2018.
- LIU, C. et al. A Cyber-Physical Machine Tools Platform using OPC UA and MTConnect. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 51, n. June 2018, p. 61–74, 2019.
- LIU, C.; XU, X. Cyber-physical Machine Tool - The Era of Machine Tool 4.0. **Procedia CIRP**, v. 63, p. 70–75, 2017.
- LIU, X. F. et al. Cyber-physical manufacturing cloud: Architecture, virtualization, communication, and testbed. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 43, p. 352–364, 2017.
- MEISSNER, H.; AURICH, J. C. Implications of Cyber-Physical Production Systems on Integrated Process Planning and Scheduling. **Procedia Manufacturing**, v. 28, p. 167–173, 2019a.
- MEISSNER, H.; AURICH, J. C. ScienceDirect ScienceDirect ScienceDirect Implications of Cyber-Physical Production Systems on Integrated Implications of Cyber-Physical Production Systems on Integrated Process Planning and Scheduling Process Planning and Scheduling Institute for Costing. **Procedia Manufacturing**, v. 28, p. 167–173, 2019b.
- MITTAL, S. et al. Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 233, n. 5, p. 1342–1361, 2019.
- MOHAMMADI, A. et al. A methodology for online visualization of the energy flow in a machine tool. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 19, p. 138–146, 2017.

MORTEZA GHOBAKHLOO. The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. 2018.

MOSCH, D. C. Industrie 4.0 Communication Guideline. 2017.

MOURTZIS, D.; MILAS, N.; ATHINAIOS, N. Towards Machine Shop 4.0: A General Machine Model for CNC machine-tools through OPC-UA. **Procedia CIRP**, v. 78, p. 301–306, 2018.

MUBAROK, K. et al. Manufacturing service reliability assessment in cloud manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 72, n. ii, p. 940–946, 2018.

O'DONOVAN, P. et al. An industrial big data pipeline for data-driven analytics maintenance applications in large-scale smart manufacturing facilities. **Journal of Big Data**, v. 2, n. 1, p. 1–26, 2015a.

O'DONOVAN, P. et al. An industrial big data pipeline for data-driven analytics maintenance applications in large-scale smart manufacturing facilities. **Journal of Big Data**, v. 2, n. 1, p. 1–26, 2015b.

OKS, S. J.; FRITZSCHE, A.; MÖSLEIN, K. M. Engineering industrial cyber-physical systems: An application map based method. **Procedia CIRP**, v. 72, p. 456–461, 2018.

OLIVEIRA, L. E. S.; ÁLVARES, A. J. Axiomatic Design Applied to the Development of a System for Monitoring and Teleoperation of a CNC Machine through the Internet. **Procedia CIRP**, v. 53, p. 198–205, 2016.

RYMASZEWSKA, A.; HELO, P.; GUNASEKARAN, A. IoT powered servitization of manufacturing – an exploratory case study. **International Journal of Production Economics**, v. 192, n. March, p. 92–105, 2017a.

RYMASZEWSKA, A.; HELO, P.; GUNASEKARAN, A. IoT powered servitization of manufacturing – an exploratory case study. **International Journal of Production Economics**, v. 192, n. October 2015, p. 92–105, 2017b.

SAHAY, B. S.; RANJAN, J. Real time business intelligence in supply chain analytics. **Information Management and Computer Security**, v. 16, n. 1, p. 28–48, 2008.

SAMIR, K. et al. Key Performance Indicators in Cyber-Physical Production Systems. **Procedia CIRP**, v. 72, p. 498–502, 2018.

SANCHEZ, J. A. et al. Unexpected event prediction in wire electrical discharge machining using deep learning techniques. **Materials**, v. 11, n. 7, p. 1–12, 2018.

SCHREIBER, M. et al. Integrated production and maintenance planning in cyber-physical production systems. **Procedia CIRP**, v. 79, p. 534–539, 2019.

SCHUH, G. et al. Industrie 4.0 Maturity Index. **Acatech Study**, p. 62, 2017.

SONY, M.; NAIK, S. Key ingredients for evaluating Industry 4.0 readiness for organizations: a literature review. **Benchmarking**, 2019.

SUPEKAR, S. D. et al. A framework for quantifying energy and productivity benefits of smart manufacturing technologies. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 699–704, 2019.

TAO, F. et al. Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. **Engineering**, 2019.

THEORIN, A. et al. An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 5, p. 1297–1311, 2017.

UPASANI, K. et al. Distributed maintenance planning in manufacturing industries. **Computers and Industrial Engineering**, v. 108, p. 1–14, 2017a.

UPASANI, K. et al. Distributed maintenance planning in manufacturing industries. **Computers and Industrial Engineering**, v. 108, p. 1–14, 2017b.

YU, H.; QI, H.; LI, K. CPSS: A study of Cyber Physical System as a Software-defined Service. **Procedia Computer Science**, v. 147, p. 528–532, 2019.

ZHENG, P. et al. A systematic design approach for service innovation of smart product-service systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 657–667, 2018.

ZHU, Z.; LIU, C.; XU, X. Visualisation of the digital twin data in manufacturing by using augmented reality. **Procedia CIRP**, v. 81, p. 898–903, 2019.

ŽUPERL, U.; ČUŠ, F. A cyber-physical system for surface roughness monitoring in end-milling. **Journal of Mechanical Engineering**, v. 65, n. 2, p. 67–77, 2019.