

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 16/11/2023.

Joel Ravelli Junior

Arquitetura de Dados baseada no RAMI 4.0 para Manufatura Flexível na
Indústria 4.0

Sorocaba
2022

Joel Ravelli Junior

Arquitetura de Dados baseada no RAMI 4.0 para Manufatura Flexível na
Indústria 4.0

Dissertação de defesa apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, interunidades, entre o Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba e o Campus de São João da Boa Vista da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Área de concentração: Automação
Orientador: Prof. Dr. Eduardo Paciência Godoy

Sorocaba
2022

R252a Ravelli Junior, Joel
Arquitetura de Dados baseada no RAMI 4.0 para Manufatura Flexível na Indústria 4.0 / Joel Ravelli Junior. -- São João da Boa Vista, 2022
102 p. : tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista
Orientador: Eduardo Paciencia Godoy

1. Automação industrial. 2. Internet das coisas. 3. Interface de programação de aplicativos (software de computador). 4. Automação. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Arquitetura de Dados baseada no RAMI 4.0 para Manufatura Flexível na Indústria 4.0

AUTOR: JOEL RAVELLI JUNIOR

ORIENTADOR: EDUARDO PACIÊNCIA GODOY

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, área: Automação pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba

Prof. Dr. LEOPOLDO ANDRÉ DUTRA LUSQUINO FILHO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Câmpus de Sorocaba

Prof. Dr. MARCOSIRIS AMORIM DE OLIVEIRA PESSOA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos / Escola Politécnica da USP

Sorocaba, 16 de novembro de 2022

“Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem. Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo.”

Walter S. Landor

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Godoy pela condução do meu trabalho.

A minha família e amigos, que me deram todo o suporte necessário.

Ao governo brasileiro, por oportunidades de estudar em instituições de excelência.

RESUMO

A Indústria 4.0 e Internet das Coisas (IoT) habilitaram a conectividade necessária para a transferência de informações, análises e controle de dados, possibilitando o aumento da produtividade dos negócios por meio de rápidas mudanças no escopo de produção em um mercado cada vez mais volátil. A inovação da IoT e Indústria 4.0 são vistas integrando sistemas de manufatura, gerenciando regras de negócios e descentralizando recursos de computação, permitindo mudanças rápidas por meio do uso da internet com segurança e confiabilidade. Para que isso aconteça, o Modelo de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0 (RAMI 4.0) foi elaborado, sistematizando os elementos da Indústria 4.0 em um modelo de camadas tridimensional. Um dos grandes desafios para a adoção do RAMI 4.0 é o desenvolvimento de soluções que suportem as funcionalidades de cada camada e as interações necessárias entre os seus elementos. Este trabalho objetiva o desenvolvimento de uma arquitetura de dados focada na Camada da Informação do RAMI 4.0 para aplicações de manufatura flexível na Indústria 4.0. Essa arquitetura foca na definição de um modelo da informação composto pelo banco e modelo de dados para estruturar e organizar a informação. Este trabalho demonstra também o desenvolvimento de um orquestrador para interconectar a comunicação industrial OPC UA com o framework de microsserviços utilizado para a criação de aplicações no formato de serviços em nuvem. Essa arquitetura na Camada da Informação viabiliza uma interface para fornecer ao cliente a capacidade de inserir, visualizar e até mesmo modificar um pedido em uma fábrica com base em suas necessidades e prioridades, proporcionando maior versatilidade e interoperabilidade na comunicação com as demais camadas superiores do RAMI 4.0. A arquitetura de dados foi testada e validada através de experimentos realizados num cenário de manufatura flexível com diferentes tipos de produtos, rotas e pedidos de produção. Os resultados demonstram como a arquitetura desenvolvida fornece uma perspectiva de produção com um serviço para manufatura flexível na Indústria 4.0, conectando sistemas de manufatura industrial com um sistema de informação para interface de negócio.

Palavras-chave: Automação industrial, Internet das coisas, Interface de programação de aplicativos (software de computador), Automação.

ABSTRACT

Industry 4.0 and the Internet of Things (IoT) have provided the connectivity required for information transfer, data analysis and control, enabling increased business productivity through rapid changes in the scope of production in a market increasingly volatile. The innovation of IoT and Industry 4.0 are applied in integrating manufacturing systems, managing business rules, and decentralizing computing resources, enabling rapid changes using the internet safely and reliably. For this to happen, the Reference Architecture Model for Industry 4.0 (RAMI 4.0) was developed, systematizing the elements of Industry 4.0 in a three-dimensional layered model. One of the great challenges for the adoption of RAMI 4.0 is the development of solutions that support the functionalities of each layer and the necessary interactions between its elements. This work aims to develop a data architecture focused on the Information Layer of RAMI 4.0 for flexible manufacturing applications in Industry 4.0. This architecture focuses on defining an information model composed of the database and data model to structure and organize the information. This work also demonstrates the development of an orchestrator to interconnect the OPC UA industrial communication with the microservices framework used to create applications in the form of cloud services. The architecture in the Information Layer enables an interface to provide the customer with the ability to enter, view and even modify an order in a factory based on their needs and priorities, providing greater versatility and interoperability in communication with the other upper layers of RAMI. 4.0. The data architecture was tested and validated through experiments in a flexible manufacturing scenario with different types of products, routes, and production orders. The results demonstrate how the developed architecture provides a production perspective with a service for flexible manufacturing in Industry 4.0, connecting industrial manufacturing systems with an information system for the business interface.

Keywords: Industrial Automation, Internet of Things, Application Programming Interface (Software Computing), Automation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos comuns entre IoT e industrial, permitem o surgimento de uma interseção entre a indústria tradicional e elementos de IoT, que viabilizam a IIoT. ...	15
Figura 2 - Integração entre processos para uma manufatura baseada em serviços e não em clientes.	17
Figura 3 - Linha do tempo das revoluções industriais.....	22
Figura 4 - As principais tecnologias que compõem a Indústria 4.0.	22
Figura 5 - Arquitetura refinada de quatro camadas para sistemas de manufatura....	29
Figura 6 - Visão geral da linguagem de marcação de automação.	31
Figura 7 - Regras de mapeamento entre AML e o OPC UA.....	32
Figura 8 - Exemplo de AML mapeado e OPC UA.....	32
Figura 9 - Diagrama do modelo refinado para um sistema de manufaturas.....	33
Figura 10 - Diagrama UML OCG SensorThings API.	35
Figura 11 - Modelo da Arquitetura de Referência Indústria 4.0 (RAMI 4.0).	36
Figura 12 - Estrutura básica do AAS.	37
Figura 13 - Tela do editor e visualizador AASX Package Explorer.	37
Figura 14 - Modelo RAMI 4.0.	41
Figura 15 - Visão macro das camadas do RAMI 4.0 aplicados na proposta.	53
Figura 16 - Funcionalidades disponíveis Node-RED / node-opcua.....	59
Figura 17 - Fluxo geral da informação entre as camadas do RAMI 4.0.....	63
Figura 18 - Arquitetura das Camadas de Comunicação e Informação.	65
Figura 19 - Partes principais da camada da informação.	67
Figura 20 - Modelagem Geral do Banco de Dados.....	70
Figura 21 - Collection Client.....	72
Figura 22 - Exemplo do documento JSON Collection Client.	72
Figura 23 - Collection Order.....	73
Figura 24 - Exemplo do documento JSON Collection Order.	73
Figura 25 - Collection KnowledgeRoute.	74

Figura 26 - Exemplo do documento JSON Collection KnowledgeRoute.	74
Figura 27 - Collection Item.	75
Figura 28 - Exemplo do documento JSON Collection Item.	75
Figura 29 - Collection ItemRoute.	76
Figura 30 - Exemplo do documento JSON Collection ItemRoute.	77
Figura 31 - Collection Thing.	77
Figura 32 - Exemplo do documento JSON Collection Thing.	78
Figura 33 - Collection Datastream.	78
Figura 34 - Exemplo do documento JSON Collection Datastream.	80
Figura 35 - Collection Sensor.....	80
Figura 36 - Exemplo do documento JSON Collection Sensor.....	81
Figura 37 - Collection ObservedProperty.	81
Figura 38 - Exemplo do documento JSON Collection ObservedProperty.....	82
Figura 39 - Prova de conceito: detalhes das tecnologias e componentes utilizados e suas interações entre camadas do RAMI 4.0.....	83
Figura 40 - Demonstração de uma estação de produção.....	85
Figura 41 - Estações demonstrando os retornos possíveis.....	87
Figura 42 - Criação de uma ordem e 2 itens para avaliação da produção na fábrica.	88
Figura 43 - EPC 000000000027 passando corretamente por todas as estações.	89
Figura 44 - O estado da ordem após finalização do primeiro item.....	89
Figura 45 - A roda do EPC 000000000028.	90
Figura 46 - O estado final da ordem.	90
Figura 47 - Ordem de produção de 2 itens e PN AAAA.	91
Figura 48 - Ordem de produção com 2 itens com PN BBBB.....	92
Figura 49 - Tela de atualização de itens.	93
Figura 50 - Tela para deleção de Ordens e Itens.....	94

LISTA DE ABREVIACES

ASS	Asset Administration Shell
API	Application Programming Interface
BPMN	Business Process Model and Notation
CLP	Controlador lgico programvel
COAP	Constrained Application Protocol
COM	Component Object Model
CPPS	Cyber-Physical Production System
CPS	Cyber Physical Systems
DCOM	Distributed Component Object Model
EPC	Electronic Product Code
ERP	Enterprise Resource Planning
FDI	Field Device Integration
HDA	Historical Data Access
HW	Hardware
HMI	Human-Machine Interface
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure
I/O	Input/Output
IEC	International Electrotechnical Commission
IoT	Internet of Things
IIoT	Industrial Internet of Things
IoS	Internet of Services
IP	Internet Protocol
KPI	Key Performance Indicator
OPC UA	Open Protocol Communications Unified Architecture

OPC AE	Open Protocol Communications Alarms & Events
OPC HDA	Open Protocol Communications Historical Data Access
OPC DA	Open Protocol Communications Data Acquisition
OMG	Object Management Group
PLC	Programmable Logic Controller
PN	Part Number
PrSE	Production System Engineering
RAD	Rapid Application Development
RAMI 4.0	Reference Architecture Model for Industry 4.0
REST	Representational State Transfer
RFID	Radio Frequency Identification
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SDK	Software Development Kit
SI	Sistema Internacional de Unidades
SQL	Structured Query Language
SOA	Service oriented Architecture
SW	Software
TCP	Transmission Control Protocol
TI	Tecnologia da Informação
UA	Unified Architecture
URL	Uniform Resource Locator
WEB	World Wide Web

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	15
1.1. Contextualização	15
1.2. Objetivos	19
1.3. Estrutura e conteúdo	19
2- REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1. Indústria 4.0	21
2.2. Estrutura da Informação para Indústria 4.0	24
2.3. Padrões e Modelos de Dados	30
2.3.1. AutomationML	30
2.3.2. OCG SensorThings API.....	34
2.4. Asset Administration Shell.....	35
2.4.1. Submodelos e Propriedades	36
2.4.2. Modelo de Componente da Indústria 4.0	38
3- REVISÃO CONCEITUAL	39
3.1. RAMI 4.0	39
3.1.1. Eixo de Níveis de Hierarquia	41
3.1.2. Eixo de Fluxo de Valor e Ciclo de Vida	42
3.1.3. Eixo de Camadas.....	43
3.1.4. Comunicação Aberta para a Indústria 4.0.....	45
3.2. OPC UA	45
3.2.1. OPC Clássico	46
3.2.2. Conceitos do OPC UA	47
3.2.3. OPC UA e RAMI 4.0	48
3.2.4. Segurança do OPC UA.....	51
4- MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
4.1. Proposta do Trabalho	52
4.2. Tecnologias Utilizadas	55
4.2.1. Node.js	55

4.2.2. Framework Molecular	56
4.2.3. Node-RED e node-opcua	58
4.2.4. Mongo DB	59
5- DESENVOLVIMENTO	62
5.1. Camada de Comunicação.....	65
5.2. Camada da Informação	66
5.2.1. OPC UA Orchestrator	67
5.2.2. Modelagem da Informação	68
5.3. Prova de Conceito	82
5.3.1. Ferramentas da Prova de Conceito	82
5.3.2. Descrição dos Cenários e Simulação	84
5.3.3. Execução de Cenários de Teste	87
5.4. Discussões e Considerações Finais	94
6- CONCLUSÃO	97
7- REFERÊNCIAS.....	99

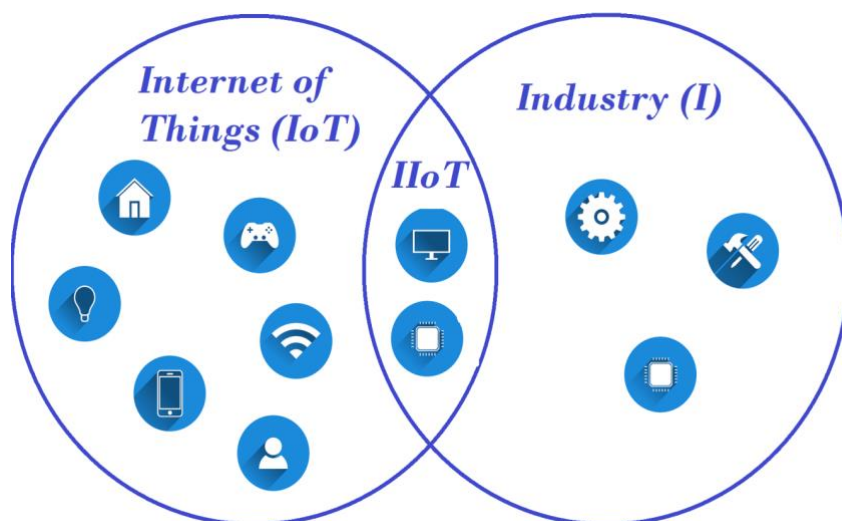
1- INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Embasada nos avanços tecnológicos das últimas décadas, a tecnologia da informação veio moldando a sociedade como a conhecemos. Diversas tecnologias emergiram recentemente e mudaram a maneira como pensamos sobre o aumento da produtividade e redefiniram modelos de negócios. O surgimento da Internet das Coisas, do inglês *Internet of Things* (IoT), combinado com a relação entre inúmeros dispositivos, que se comunicam repetidamente para produzir e capturar dados que, ao serem consumidos e interpretados, geram *insights*, relatórios sucintos com informações chave para rápida interpretação e tomada de decisões (HASSANZADEH, 2015).

A evolução e o desenvolvimento das tecnologias digitais propiciaram a criação de novos métodos de produção nas indústrias globais baseados na automação, robótica, inteligência artificial, IoT e inteligência de dados, dentre outras inovações. A combinação entre a IoT e a indústria, representada pela Figura 1, derivou para a criação do conceito de Internet das Coisas Industrial (*Industrial Internet of Things* - *IIoT*).

Figura 1 - Elementos comuns entre IoT e industrial, permitem o surgimento de uma interseção entre a indústria tradicional e elementos de IoT, que viabilizam a IIoT.



Fonte: autoria própria.

IIoT foi definida pela utilização de tecnologias que afetam diretamente a automação em infraestrutura crítica e melhoram a produtividade empresarial (HASSANZADEH, 2015). A utilização dessas tecnologias no contexto industrial, coordenadas de modo a conferir competitividade ao negócio, otimizar a eficiência da cadeia produtiva, adicionar valor ao produto, racionalizar o uso dos recursos e customizar as soluções tecnológicas, é chamada de Indústria 4.0.

A IIoT tornou-se um dos elementos chave da Manufatura Inteligente e da Quarta Revolução Industrial, de acordo com Eruvankai (2017), a Indústria 4.0 foi introduzida pela primeira vez na feira de Hannover em 2011, devido a uma iniciativa do governo alemão adotada como parte do plano de ação estratégico de alta tecnologia para 2020 (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

Os esforços citados pelo governo alemão e trabalhos da literatura se concentraram no estudo da estrutura do RAMI 4.0, para desenvolver soluções compatíveis com os requisitos de aplicações Indústria 4.0. Em Kagermann (2013) é apontado que essas demonstrações devem ser desenvolvidas e disponibilizadas ao mercado o mais rápido possível, considerando sua implementação estratégica e a adaptação das tecnologias e experiências básicas existentes aos requisitos de manufatura.

De acordo com Suri (2017), a Indústria 4.0 é uma das iniciativas mais proeminentes em direção à visão de manufatura inteligente para promover eficiência e sinergia entre fornecedores, produtores e clientes. A disponibilidade de uma ampla gama de dados e informações no contexto de Sistemas de Produção Cibernéticos-Físicos (do inglês *Cyber-Physical Production System CPPS*), oferecem uma grande possibilidade de criação de novas oportunidades de negócios. No entanto, para que essas oportunidades de negócios se materializem, com sucesso, é evidente a necessidade de uma comunicação eficiente e visualização clara de novas estratégias e do processo operacional subjacente entre todas as partes interessadas envolvidas na cadeia de valor da manufatura.

Promover a integração entre essas tecnologias é um dos grandes desafios da Indústria 4.0, que visa a evolução da realidade produtiva através da integração de dados e informações, além da tomada de decisões em tempo real. Muitos trabalhos têm focado no desenvolvimento de soluções que agreguem essas tecnologias e

permitam a integração dos processos produtivos e equipamentos de automação a serviços de TI que estão armazenados na nuvem.

Por esse motivo, o RAMI 4.0 surgiu propondo um modelo de arquitetura de referência para a Indústria 4.0, onde podemos destacar a sua arquitetura orientada a serviços ou SOA e eixos estruturais: níveis de hierarquia, ciclo de vida e fluxo de valor e camadas ou níveis. Esse diagrama tridimensional do RAMI 4.0 foi realizado pela Associação Alemã de Fabricantes Elétricos e Eletrônicos (*German Electrical and Electronic Manufacturers' Association - ZVEI*), para apoiar as iniciativas da Indústria 4.0, que estão alcançando ampla aceitação em todo o mundo. Conceitos, estrutura e métodos da Indústria 4.0 estão sendo adotados em todo o mundo para modernizar a manufatura (LYDON, 2019).

Na Figura 2, pode-se ver a interconexão entre objetos, serviços, pessoas e máquinas. A centralização de dados e informações viabilizou a quarta revolução indústria, através de uma maior perspectiva de controle em tempo real, viabilizando soluções automatizadas em larga escala.

Figura 2 - Integração entre processos para uma manufatura baseada em serviços e não em clientes.



Fonte: Autoria própria.

O grande desafio para adoção do RAMI 4.0 se encontra no desenvolvimento de soluções que suportem as funcionalidades de cada camada e as interações requeridas entre os elementos de cada camada. Nikolaidis et al. (2015) propõem a interação entre dois conceitos: a utilização de controladores em nuvem com dispositivos baseados em IIoT (NIKOLAIDIS, *et al.*, 2015). Enquanto, Wu et al. (2013) exploram o conceito de *Cloud Manufacturing*, que é um modelo de produção baseado em nuvem (WU D.; D., 2013), Chen et al. 2010 apresentam a ideia de *Robot as a Service* ou RAAS, sendo esse um serviço na nuvem para acesso a hardware e software de um robô (CHEN; DU; GARCÍA-ACOSTA, 2010).

Com base nas necessidades e desafios acima mencionados, este projeto se concentra nos estudos da Camada da Informação do RAMI 4.0 e interações de seus elementos para desenvolvimento de uma arquitetura de dados baseada no RAMI 4.0 para suportar aplicações de manufatura flexível na Indústria 4.0. A Camada da Informação foca no modelo da informação e estrutura dos dados, ou seja, como os dados são organizados e armazenados e como a informação é trafegada. O RAMI 4.0 permite a estruturação dos dados dentro da camada da informação, preferencialmente de maneira única, facilitando a disponibilização.

A manufatura flexível é um conceito que permite maior customização, fabricação de lotes menores sem perder eficiência, e produção mais ágil, através de uma produção assíncrona dentro do chão de fábrica. O produto não tem uma linha a percorrer para se tornar um bem final, ele navega pelas estações que contribuem para a construção do bem final, a partir de uma rota de produção específica para ele. Dessa forma, este trabalho foca na proposta de uma arquitetura de dados que simplifique entendimento na Camada da Informação.

Por isso, nesta proposta é utilizado o modelo de dados no formato JSON baseado no padrão proposto pelo *SensorThings API*, pertencente ao *Open Geospatial Consortium (OGC)*. Esse modelo habilita criar interfaces de programação de aplicações, que utilizem o protocolo de comunicação HTTP, serviços RESTful e modelo de dados no formato JSON (BECKER, *et al.*, 2020). Além disso, é proposta a criação de uma conexão ponte (bridge) nesse trabalho, chamada de Orquestrador OPC UA, entre a comunicação industrial OPC UA e o framework Moleculer de microserviços. Essa conexão criará uma interface permitindo ao cliente a capacidade de inserir, visualizar e até mesmo modificar um pedido com base em suas

necessidades e prioridades, permitindo que a indústria implemente mudanças rápidas para se adaptar ao mercado, originando um modelo de manufatura flexível, como um serviço em aplicações da Indústria 4.0.

Este trabalho faz parte de um projeto de pesquisa mais amplo do que é aqui apresentado. O foco macro é o desenvolvimento de uma arquitetura orientada a microserviços baseada em todas as camadas (*Layers*) do RAMI 4.0, e este trabalho está especificamente focado na Camada de Informação, porém como possui grande sinergia com as camadas adjacentes (Comunicação e Funcional) do RAMI 4.0. Elas acabam sendo brevemente abordadas, integrando-se com todas as demais camadas do modelo, através de uma arquitetura baseada em serviços.

1.2. Objetivos

Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma arquitetura de dados para a Camada da Informação do RAMI 4.0 para aplicações de manufatura flexível na Indústria 4.0. A integração de tecnologias é baseada no protocolo de comunicação OPC UA e no framework Molecular de microserviços para a criação de aplicações no formato de serviços em nuvem, proporcionando maior versatilidade e interoperabilidade em aplicações de produção como um serviço.

1.3. Estrutura e conteúdo

A estrutura deste trabalho ficou dividida em 6 capítulos, considerando esta introdução e desconsiderando as referências bibliográficas.

O Capítulo 2 trata de uma revisão da literatura que relaciona os principais tópicos do tema, como Indústria 4.0, estrutura da Camada da Informação para Indústria 4.0 e além de um estudo aprofundado de trabalhos pertinentes na área. A camada e modelagem da informação é um assunto de grande complexidade pois visa unificar aspectos fabris de maneira generalizada. Dentro desta contextualização, são apresentadas as pesquisas mais relevantes que foram publicadas com base no objeto de estudo proposto.

O Capítulo 3 apresenta os conceitos relacionados do RAMI4.0 e OPC UA, uma visão da arquitetura proposta para o desenvolvimento de uma interface controladora para Indústria 4.0 e a contextualização do RAMI4.0, explicando os

níveis de hierarquia e o fluxo de valor do ciclo de vida, juntamente com o OPC clássico e seguido pelo OPC UA.

O Capítulo 4 apresenta os materiais e métodos, uma visão da arquitetura proposta para o desenvolvimento de uma interface controladora para Indústria 4.0, juntamente com as tecnologias necessárias para a implementação da proposta.

O Capítulo 5 destaca os resultados experimentais obtidos com a implementação de software apresentado e as principais simulações, resultados e análises realizadas.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as considerações finais e as conclusões retiradas da elaboração do trabalho.

6- CONCLUSÃO

Esta pesquisa apresentou e implementou uma arquitetura em microsserviços para aplicações de manufatura flexível na Indústria 4.0, desenvolvido com o framework Moleculer, e que envolve todas as seis camadas de TI do RAMI 4.0. Com foco na camada da Informação e modelagem de informação e banco de dados, a pesquisa mostra todos os ciclos de produção combinados sob uma perspectiva de ponta a ponta, de produção baseada em serviços.

A modelagem da informação apresentou o desenvolvimento como proposto pelo *OCG SensorThings API*, com adequações pertinentes para tornar possível a proposta do trabalho sob ótica da manufatura orientado ao cliente. Ao invés da proposta tradicional, este trabalho traz a proposta de produção orientada a produto, e implementou a flexibilidade necessária para Indústria 4.0. A modelagem da informação levou em consideração as várias fontes de dados presentes na produção fabril; e a simplificação do modelo possibilitou a modelagem da informação de forma flexível com banco de dados.

O protocolo de comunicação sugerido nas especificações do RAMI 4.0 é o OPC UA, e por este motivo, o autor desenvolveu um orquestrador para interconectar a comunicação industrial OPC UA com o framework de microsserviços Moleculer. O orquestrador OPC UA é uma entrega chave deste trabalho, e está presente na camada de Informação que é capaz de coletar e gerenciar os dados que são produzidos pelos servidores OPC UA no chão de fábrica.

O projeto também contempla a implementação da prova de conceito com a finalidade de demonstração, lado a lado com os componentes de software citados. A POC demonstra um cenário em que os clientes podem realizar pedidos, visualizar o seu estado na produção da fábrica, apagar itens ou ordens de produção e modificar itens de um PN para outro. Esta última opção é importante para demonstrar a adaptabilidade da fábrica, permitindo que o cliente controle rapidamente às mudanças de seus pedidos baseado em seu negócio, sem que a fábrica perca a governança da produção; este é um diferencial importante para o cliente. O sistema de produção precisa ser capaz de se adaptar em um mercado em constante evolução, produzindo os itens que o cliente precisa com mais rapidez e versatilidade.

A arquitetura proposta para a manufatura flexível viabilizou a interface cliente-fábrica, proporcionando maior versatilidade e interoperabilidade na camada da informação, com as demais camadas do RAMI 4.0. Este trabalho entrega um projeto completo e adaptável para trabalhar em uma manufatura flexível, entregando modelagem de dados para Indústria 4.0, uso de eventos permitindo a programação assíncrona, rastreamento da informação trafegada entre serviços, e um conjunto completo de softwares em forma de microsserviços para a fábrica; além disso, serviu como uma plataforma de produção, que pode ser controlada pelo cliente, usando os microsserviços e APIs.

7- REFERÊNCIAS

AASX Package Explorer. **Github**. Disponível em: <<https://github.com/admin-shell-io/aasx-package-explorer>>. Acesso em: 28 jan. 2021.

ADOLPHS, P. et al. The Reference Architectural Model RAMI 4.0 and the Industrie 4.0 Component. **zvei.org**, 2015. Disponível em: <<https://www.zvei.org/en/subjects/industry-4-0/the-reference-architectural-model-rami-40-and-the-industrie-40-component/>>. Acesso em: 26 nov. 2020.

ALLWEYER, T. **BPMN 2.0: introduction to the standard for business process modelling**. [S.l.]: [s.n.], 2016.

BASSI, L. **Industry 4.0 Hope, hype or revolution?** IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI). Modena: [s.n.]. 2017.

BECKER, K. et al. Usage of Standards in the Smart Factory Web Testbed. **SMART FACTORY WEB**, 29 jun. 2020. Disponível em: <https://www.iiconsortium.org/pdf/Usage_of_Standards_in_Smart_Factory_Web_TB_White_Paper_2020-06-29.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2021.

BIGHETTI, J. A. **Arquitetura de Automação e Controle Orientada a Microserviços para a Indústria 4.0**. Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Sorocaba, p. 146. 2020.

BURKE, T. OPC Unified Architecture Interoperability for Industrie 4.0 and the Internet of Things. **opcfoundation.org**, jun. 2018. Disponível em: <<https://opcfoundation.org/wp-content/uploads/2017/11/OPC-UA-Interoperability-For-Industrie4-and-IoT-EN.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2020.

CANTELON, M. et al. **NodeJs Action Manning**. 1. ed. Nova Iorque: Manning Publications Co, 2013.

CHAUHAN, A. A Review on Various Aspects of MongoDB. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, v. 8, n. 5, p. 90-92, Maio 2019. ISSN ISSN: 2278-0181.

CHEN, Y.; DU, Z.; GARCÍA-ACOSTA, M. **Robot as a service in cloud computing**. IEEE Int. Symp. Serv. Oriented Syst. Eng. [S.l.]: [s.n.]. 2010. p. 151-158.

CLASSIC - OPC Foundation. **OPC Foundation**, 2019. Disponível em: <<https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-classic/>>. Acesso em: 27 nov. 2020.

CONTRENAS, J. D.; GARCIA, J. I.; PASTRANA, J. D. Developing of Industry 4.0 Applications. **International Journal of Online Engineering**, v. 13, 2017.

DAMODARAN, D. B. . S. S. V. S. M. PERFORMANCE EVALUATION OF MYSQL AND MONGODB DATABASES. **International Journal on Cybernetics & Informatics (IJCI)**, v. 5, n. 2, p. 387- 394, Abril 2016.

DOCKER. **Docker.com**, 2022. Disponível em: <<https://www.docker.com/>>. Acesso

em: 22 set. 2022.

DRAHOŠ, P. et al. **Trends in industrial communication and OPC UA**. 2018 Cybernetics & Informatics (K&I). Lazy pod Makytou: IEEE. 2018. p. 1-5.

ECKHARDT, A.; MULLER, S.; LEURS, L. **An Evaluation of the Applicability of OPC UA Publish Subscribe on Factory Automation use Cases**. 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). [S.l.]: [s.n.]. 2018.

ERUVANKAI, S.; MUTHUKRISHAN, M.; MYSORE, A. K. Accelerating IIOT Adoption with OPC UA.. **Internetworking Indonesia Journa**, v. 9, n. 1, p. 3-8, 2017.

GANDOMI, A. . H. M. Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. **International Journal of Information Management**, v. 35, n. 2, p. 137 – 144, 2015.

GRÜNER, S.; PFROMMER, J.; PALM, F. RESTful Industrial Communication With OPC UA. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 12, 2016. 1832-1841.

HASSANZADEH, A. . M. S. A. M. S. **Towards Effective Security Control Assignment in the Industrial Internet of Things**. IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT). [S.l.]: [s.n.]. 2015. p. 6.

HISTORY - OPC Foundation. **OPC Foundation**, 2019. Disponível em: <<https://opcfoundation.org/about/opc-foundation/history/>>. Acesso em: 27 nov. 2020.

HOPPE, S. There Is No Industrie 4.0 without OPC UA. **opcfoundation.org**, 2017. Disponível em: <<https://opcconnect.opcfoundation.org/2017/06/there-is-no-industrie-4-0-without-opc-ua/>>. Acesso em: 27 nov. 2020.

IEC 61360-1. **IEC**, 2017. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/28560>>. Acesso em: 12 dezembro 2022.

IEC 62832-2. **IEC**, 2020. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/60214>>. Acesso em: 12 dezembro 2022.

ISO 13584-42. **ISO.org**, 2010. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/43423.html>>. Acesso em: 12 dezembro 2022.

ISO/TS 29002-10. **ISO.org**, 2009. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/50774.html>>. Acesso em: 12 dezembro 2022.

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

JUNIOR, J. R. **Disertação de Mestrado em andamento**. Sorocaba, Brasil. 2021.

KAGERMANN, ; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. **acatech**, 2013. Disponível em: <<https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>>. Acesso em:

26 nov. 2020.

KHAKIFIROOZ, M. et al. A System Dynamic Model for Implementation of Industry 4.0. **2018 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)**, 2018.

KIRMSE, A. . K. F. . H. M. **Industrial big data: From data to information to actions**. Proceedings of the 4th International Conference on Internet of Things, Big Data and Security. [S.l.]: SciTePress. 2019.

KOTA, A. K.; PRABHU, D. M. Node.js: Lightweight, Event driven I/O web development. **Informatics NIC**, Janeiro 2013. ISSN 10.13140/RG.2.1.2591.9849.

LABIRINTIS, A. . J. H. V. . Challenges and opportunities with big data, v. 5, n. 12, p. 2032-2033, 2012.

LEE, E. A.; SESHIA, S. A. **Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach**. 2ª. ed. [S.l.]: MIT Press, 2017.

LIANG, S.; HUANG, C.-Y.; KHALAFBEIGI, T. OGC SensorThings API Part 1: Sensing. **Openegeospatial.org**, 2016. Disponível em: <<https://docs.openegeospatial.org/is/15-078r6/15-078r6.html>>. Acesso em: dezembro 2022.

LU, H.; ZHIFENG, Y. **Research on key technology of the address space for OPC UA Server**. 2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control. [S.l.]: IEEE. 2010.

LYDON, B. RAMI 4.0 Reference Architectural Model for Industrie 4.0. **International Society of Automation**, 2019. Disponível em: <<https://www.isa.org/intech-home/2019/march-april/features/rami-4-0-reference-architectural-model-for-industr>>. Acesso em: 2020 nov. 26.

MALVI, K. The Positive and Negative Aspects of Node.js Web App Development. **Mind Inventory**, 2018. Disponível em: <<https://www.mindinventory.com/blog/pros-and-cons-of-node-js-web-app-development>>. Acesso em: 24 out. 2021.

MARR, B. What is Industry 4.0? Here's A Super Easy Explanation For Anyone. **Forbes**, 2018. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2018/09/02/what-is-industry-4-0-heres-a-super-easy-explanation-for-anyone/?sh=6dd4c27a9788>>. Acesso em: 26 nov. 2020.

MARSEU, E.; KOLBERG, D.; WEYER, S. Exemplary transfer of the RAMI 4.0 Administration Shell to the SmartFactoryKL System Architecture for Industrie 4.0 Production Systems. **smartfactory.de**, 2017. Disponível em: <https://smartfactory.de/wp-content/uploads/2017/11/SF_WhitePaper_2-1_EN-1.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2020.

MELO, P. F. S. D. Dispositivo de Controle para a Indústria 4.0 baseado no RAMI 4.0 e OPC UA, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/192851/melo_pfs_me_sjbv.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2020.

MELO, P. F. S. et al. Open Source Control Device for Industry 4.0 Based on RAMI 4.0. **Electronics** **2021**, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/192851>>.

MOLECULER TRANSPORTER. Transporter. **Molecular Services**, 2021. Disponível em: <<https://molecular.services/docs/0.12/transporters.html>>. Acesso em: 16 Março 2021.

MOLECULERJS. What is Molecular? **Molecular**, 2021. Disponível em: <<https://molecular.services/docs/0.14/>>. Acesso em: 15 Março 2021.

MONGODB Features. **mongodb**, 2021. Disponível em: <<https://docs.mongodb.com/manual/introduction/>>. Acesso em: 15 Março 2021.

MONGODB. MongoDB Atlas. Fully managed MongoDB in the cloud. Disponível em: <<https://www.mongodb.com/>>. Acesso em: 22 set. 2022.

NETO, J. Z. Development of a Business Interface based on RAMI 4.0 for Flexible Manufacturing in Industry 4.0, 2022.

NIKOLAIDIS, P. et al. **Applying Mitigation Mechanisms for Cloud-based Controllers in Industrial IoT Applications**. Malardalen Real-Time Research Centre (MRTC), Malardalen University. Suécia. 2015.

NOVAK, P. . V. J. . K. P. . K. L. . K. . W. D. . B. S. **Engineering Roles and Information Modeling**. IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Zaragoza, Espanha: IEEE. 2019.

PEREIRA, C. R. **Aplicações web real-time com Node.js**. 1. ed. São Paulo: Casa do Código, v. 1, 2014.

PONTAROLLI, R. P. . B. J. A. . F. M. M. . D. F. O. . R. S. L. . G. E. P. **Microservice Orchestration for Process Control in Industry 4.0**. Metrology for Industry 4.0 & IoT 2020 IEEE International Workshop. Roma, Italia: IEEE. 2020. p. 245-249.

RAHIMI, H.; ZIBAEENEJAD, A.; SAFAVI, A. A. A Novel IoT Architecture based on 5G-IoT and Next Generation Technologies, Vancouver, 2018.

REFERENCE Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0). **Beuth**, 2016. ISSN DIN SPEC 91345. Disponível em: <<https://www.beuth.de/en/technical-rule/din-spec-91345/250940128>>. Acesso em: 28 jan. 2021.

ROBIN, A. JSON Encoding Rules SWE Common / SensorML. **OGC**, 18 jan. 2018. Disponível em: <<http://docs.opengeospatial.org/bp/17-011r2/17-011r2.html>>. Acesso em: 17 jan. 2021.

ROBO3T - ROBOMONG. Robo 3T is now Studio 3T Free. Disponível em: <<https://robomongo.org/>>. Acesso em: 22 set. 2022.

RÜTTIMANN, B. G. Lean and Industry 4.0 - Twins, Partners, or Contenders? A Due Clarification Regarding the Supposed Clash of Two Production Systems. **Journal of Service Science and Management**, v. 09, n. 06, p. 485-500, 2016.

SANISLAV, T.; LIVIU, M. Cyber-physical systems - Concept, challenges and research areas. **Control Engineering and Applied Informatics** **14**, 2012. 28–33.

SCHROTH, C.; JANNER, T. Web 2.0 and SOA: Converging Concepts Enabling the Internet of Services, v. 9, n. 3, p. 36-41, 2007.

SOOS, G. . F. D. . E. V. P. **Investigating the network traffic of Industry 4.0 applications - methodology and initial results**. International Conference on Network and Service Management (CNSM). Izmir, Turquia: IEEE. 2020.

STATISTA. Internet of Things (IoT) connected devices installed base worldwide from 2015 to 2025, 2016. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>>. Acesso em: 04 nov. 2020.

SURI, K. et al. **Modeling business motivation and underlying processes for RAMI 4.0-aligned cyber-physical production systems**. 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). [S.l.]: [s.n.]. 2017. p. 1-6.

SURI, K. et al. Modeling business motivation and underlying processes for RAMI 4.0-aligned cyber-physical production systems. **22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation**, 2017.

TELLO, D.; EDGAR, G. Industry 4.0: Application of advanced services in logistics, 2018. Disponível em: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/121967/memoria_revisada.pdf>.

UNIFIED Architecture - OPC Foundation. **opcfoundation.org**, 2019. Disponível em: <<https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>>. Acesso em: 26 nov. 2020.

VELOSA, A. . K. D. L. B. . W. R. Hype Cycle for the Internet of Things, 2020, 2020. Disponível em: <<https://www.gartner.com/en/documents/3987602/hype-cycle-for-the-internet-of-things-2020>>. Acesso em: 07 Outubro 2020.

VYATKIN, V. Software engineering in industrial automation: State-of-the-art review. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 9, n. 3, p. 1234–1249, 2013.

WANG, Y.; TOWARA, T.; ANDERL, R. Topological Approach for Mapping Technologies in Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). **Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science**, San Francisco, v. II, 2017.

WITKOWSKI, K. **Internet of Things, Big Data, Industry 4.0 – Innovative Solutions in Logistics and Supply Chains Management**. 7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management. [S.l.]: [s.n.]. dez. 2017.

WOLFGANG, M.; STEFAN-HELMUT, L.; MATTHIAS, D. **OPC Unified Architecture**. [S.l.]: Springer, 2009. ISBN ISBN 978-3-540-68899-0.

WU D., G. M. . R. D.; D., S. Cloud manufacturing: Strategic vision and state-of-the-art. **J. Manuf. Syst.**, v. 32', n. 4, p. 564-579, 2013.

YE, X.; HO HONG, S. **An AutomationML/OPC UA-based Industry 4.0 Solution for a Manufacturing System**. 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). [S.l.]: [s.n.]. 2018.

ZEZULKA, F. et al. Industry 4.0 – An Introduction in the phenomenon. **14th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems PDES**, v. 49, p. 8-12, 2016.

ZEZULKA, F. et al. **Communication Systems for Industry 4.0 and the IIoT**. 15th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems. Ostrava: [s.n.]. 2018. p. 150-155.