

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 01/12/2022.

RICARDO PASQUATI PONTAROLLI

**COMPOSIÇÃO DE SERVIÇOS E MECANISMOS DE SEGURANÇA PARA
ARQUITETURAS ORIENTADAS A MICROSERVIÇOS NA INDÚSTRIA 4.0**

Sorocaba
2020

RICARDO PASQUATI PONTAROLLI

**COMPOSIÇÃO DE SERVIÇOS E MECANISMOS DE SEGURANÇA PARA
ARQUITETURAS ORIENTADAS A MICROSERVIÇOS NA INDÚSTRIA 4.0**

Dissertação 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

2020

P811c Pontarolli, Ricardo Pasquati
Composição de serviços e mecanismos de segurança para
arquiteturas orientadas a microsserviços na indústria 4.0 / Ricardo
Pasquati Pontarolli. -- Sorocaba, 2020
103 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba
Orientador: Eduardo Paciência Godoy

1. Engenharia elétrica. 2. Indústria. 3. Controle de processo. 4.
Arquitetura orientada a serviços. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de
Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: COMPOSIÇÃO DE SERVIÇOS E MECANISMOS DE SEGURANÇA
PARA ARQUITETURAS ORIENTADAS A MICROSERVIÇOS NA
INDÚSTRIA 4.0

AUTOR: RICARDO PASQUATI PONTAROLLI

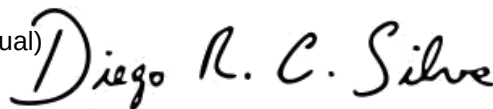
ORIENTADOR: EDUARDO PACIÊNCIA GODOY

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 Virtual)
Departamento de Engenharia de Controle e Automação
Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba



Prof. Dr. DIEGO RODRIGO CABRAL SILVA (Participação Virtual)
Escola de Ciências e Tecnologia / UFRN



Prof. Dr. PAULO JOSÉ AMARAL SERNI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Controle e Automação
Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba



Sorocaba, 01 de dezembro de 2020

RICARDO PASQUATI PONTAROLLI

**COMPOSIÇÃO DE SERVIÇOS E MECANISMOS DE SEGURANÇA PARA
ARQUITETURAS ORIENTADAS A MICROSERVIÇOS**

Dissertação 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”.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Eduardo Paciência Godoy
UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba
Orientador

Prof. Dr. Diego Rodrigo Cabral Silva
UFRN – Escola de Ciências e Tecnologia

Prof. Dr. Paulo José Amaral Serni
UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba

Sorocaba
2020

“Pensar é o trabalho mais difícil que existe. Talvez por isso tão poucos se dediquem a ele.”

Henry Ford
Fundador da Ford Motor

AGRADECIMENTO

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me mantido na trilha certa durante este projeto de pesquisa com saúde e forças para chegar até o final. Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Paciência Godoy por aceitar e conduzir o meu trabalho de pesquisa sempre para a direção certa, pelo incentivo e pela dedicação do seu escasso tempo ao meu projeto e pelas valiosas contribuições dadas durante todo o processo. Ao Prof. Dr. Paulo José Amaral Serni e Prof. Dr. Diego Rodrigo Cabral Silva pelas orientações e sugestões para deixar o trabalho mais didático possível, a todos os meus professores do curso de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista pela excelência da qualidade técnica de cada um. Também agradeço a meus novos colegas Prof. Dr. Jeferson A. Bigheti, Me. Michel M. Fernandes, Felipe O. Domingues, que sempre me ajudaram com sua vasta experiência desde o início deste projeto de pesquisa. Agradeço ao Instituto Federal de São Paulo pelo incentivo a qualificação de seus colaboradores. Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2018/19984-4 pelo apoio a realização dessa pesquisa. Sou grato à minha família pelo apoio que sempre me deram durante toda a minha vida. Aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória. À minha querida esposa Mikely pelo seu amor incondicional, pela compreensão e paciência demonstrada durante o período do projeto. Deixo aqui meu sincero obrigado a todos aqueles que, de alguma maneira, me ajudaram a chegar até aqui.

RESUMO

Novas aplicações e soluções na Indústria 4.0 se concentram na combinação de informática industrial e tecnologias de automação, incluindo a Internet Industrial das Coisas, Sistemas de Controle em Rede, Arquiteturas Orientadas a Serviços e Computação em Nuvem. O grande desafio dessas aplicações é promover a integração entre essas tecnologias, equipamentos e sistemas alocados em diferentes níveis hierárquicos dos sistemas industriais, tornando a automação colaborativa através do uso e compartilhamento de serviços para obtenção de uma arquitetura flexível, distribuída e totalmente integrada através de redes de comunicação no cenário industrial. Diante desse contexto, este trabalho enfoca no desenvolvimento de uma planta piloto industrial de controle de processos utilizando uma arquitetura orientada a microsserviços (MOA) baseada no *framework Molecular*. Essa planta piloto, com controle de nível, pressão e vazão da tubulação e pressão de reservatório, é usada como base para o desenvolvimento e testes de microsserviços e mecanismos de segurança para o controle das malhas de processo. Os microsserviços desenvolvidos são: Aquisição de Dados (DAQ), Controle PIDPlus, Rastreador para métricas, Base de dados e monitoramento de processo, e Segurança de acesso (Guarda). Diferentes mecanismos de segurança para a arquitetura são implementados, como acesso do desenvolvedor aos microsserviços via chave criptografada, requisições HTTPS, autenticação de usuários com *token*, opções de conexão com o transportador de mensagens NATS, serviço de guarda de controle de acesso entre microsserviços com JSON *Web Token*. Resultados experimentais analisam o desempenho de dois tipos de composição de microsserviços numa aplicação de controle de processo em malha fechada, sendo que a Coreografia (execução sequencial predeterminada dos microsserviços) é executada na metade do tempo da Orquestração (execução dos microsserviços gerenciada por um elemento central) e com menor variabilidade. Além disso, compara-se o desempenho da comunicação entre os microsserviços usando três tipos de transportadores de mensagem: TCP, NATS e MQTT. Os resultados demonstram que o uso de microsserviços, em ambas as composições por Coreografia e Orquestração, é compatível e confiável, cumprindo requisitos de tempo de resposta e de segurança para aplicações de automação e controle de processos, além de fornecer novos requisitos, como modularidade, escalabilidade e interoperabilidade, necessários para essas aplicações no contexto da Indústria 4.0.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Controle de Processos. Arquitetura Orientada a Serviços. *Framework Molecular*. Orquestração. Coreografia. Mecanismos de Segurança.

ABSTRACT

New applications and solutions in Industry 4.0 focus on the combination of industrial computing and automation technologies, including the Industrial Internet of Things, Network Control Systems, Service-Oriented Architectures and Cloud Computing. The great challenge of these applications is to promote the integration between these technologies, equipment and systems allocated at different hierarchical levels of industrial systems, making the collaboration collaborative through the use and sharing of services to obtain a flexible, distributed and fully integrated architecture through of communication networks in the industrial scenario. In this context, this work focuses on the development of an industrial pilot plant for process control using a microservice oriented architecture (MOA) based on the Moleculer framework. This pilot plant, with level control, pipeline pressure and flow and reservoir pressure, is used as a basis for the development and testing of microservices and safety mechanisms for the control of process loops. The microservices developed are: Data Acquisition (DAQ), PIDPlus Control, Tracker for metrics, Database and process monitoring, and Access Security (Guard). Different security mechanisms for the architecture are implemented, such as developer access to microservices via encrypted key, HTTPS requests, user authentication with token, connection options with the NATS message carrier, guard service for access control between microservices with JSON Web Token. Experimental results analyze the performance of two types of microservice composition in a closed-loop process control application, with choreography (predetermined sequential execution of microservices) being performed in half the time of the Orchestration (execution of managed microservices by a central element) and with less variability. In addition, the communication performance between microservices is compared using three types of message transporters: TCP, NATS and MQTT. The results demonstrate that the use of microservices, in both compositions by Choreography and Orchestration, is compatible and reliable, fulfilling response time and security requirements for automation and process control applications, in addition to providing new requirements , such as modularity, scalability and interoperability, necessary for these applications in the context of Industry 4.0.

Keywords: Industry 4.0. Process control. Service Oriented Architecture. Moleculer Framework. Orchestration. Choreography. Security mechanisms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Integração entre Dispositivos de Controle com a Computação e Comunicação em um sistema cyber físico.	17
Figura 2 – Os quatro estágios da revolução industrial	21
Figura 3 - Evolução da automação industrial: tradicional da automação ISA-95 (pirâmide no lado esquerdo) com uma infraestrutura plana baseada em informações para composição de serviços e aplicativos (lado direito).	25
Figura 4 - Comparativo de Estruturas Monolíticas e de Microserviços	27
Figura 5 - Composição de serviços por Orquestração	29
Figura 6 - Composição de serviços por Coreografia	30
Figura 7 - Modelo representativo de um aplicativo baseado em microserviços.	33
Figura 8 - Um modelo de referência para implantação segura de microserviços.	33
Figura 9 - Arquitetura Monolítica	35
Figura 10 - Arquitetura Orientada a Microserviços	36
Figura 11 – Arquitetura mista.....	36
Figura 12 - Criação de um Microserviço usando Função <i>createService()</i>	40
Figura 13 - Contêiner ServiceBroker do Molecular	41
Figura 14 - Configuração padrão e personalizada do ServiceBroker	41
Figura 15 - Exemplo da Propriedade Settings de um Microserviço no Molecular.....	42
Figura 16 - Método de Comunicação RPC das Chamadas Externas de Ações.....	43
Figura 17 - Chamada da Ação <i>get</i> via <i>broker.call</i> de um Microserviço do Molecular	44
Figura 18 - Exemplo da Propriedade <i>Methods</i> de um Microserviço do Molecular.....	45
Figura 19 - Diagrama de Evento Balanceado para Microserviço no Molecular.....	46
Figura 20 – Nome do Grupo do Evento de um Microserviço do Molecular	47
Figura 21 - Exemplo da Função <i>broker.emit</i> de um Microserviço do Molecular.....	47
Figura 22 - Diagrama de um Evento Broadcast de um Microserviço no Molecular	48
Figura 23 - Exemplo do Método <i>broker.broadcast</i> de um Microserviço do Molecular.....	48
Figura 24 - Fluxo de solicitação do usuário	49
Figura 25 - Planta piloto industrial.....	52
Figura 26 - P&ID da planta piloto industrial.....	53
Figura 27 - Legenda do P&ID da planta piloto industrial	54
Figura 28 – Painel de controle com <i>Raspberry Pi</i> 3B + e MegaIO Industrial	55
Figura 29 - Painel de acionamento	56

Figura 30 - Microserviço transportador	58
Figura 31 - Microserviço API Gateway	59
Figura 32 - Estrutura do controlador PIDPlus	60
Figura 33 - Esquema de criação de um banco de dados	63
Figura 34 - Escrita das variáveis dos sensores da planta-piloto no banco de dados	64
Figura 35 - Dashboard <i>Grafana</i> para Supervisão das Variáveis de Processo	65
Figura 36 - Intermediador de serviços com o parâmetro <i>metrics</i> habilitado	65
Figura 37 - Exemplo do serviço de rastreamento	66
Figura 38 - Replica de serviço	66
Figura 39 - Comandos do PM2.	67
Figura 40 - Esquema geral do hardware, com seus respectivos softwares, meios de comunicação e serviços.	69
Figura 41 - Camadas de segurança	70
Figura 42 - Comunicação entre cliente e servidor utilizando SSH	71
Figura 43 - Chave criptografada <i>rsa-key-public</i>	72
Figura 44 - Cliente SSH Putty	72
Figura 45 - Acesso ao terminal da Raspberry Pi pelo PC com cliente Putty SSH	73
Figura 46 - Listas de chaves inicializadas pelo Pageant	73
Figura 47 - Acesso em um site com HTTP e HTTPS	74
Figura 48 - Esquema do serviço API com HTTPS	75
Figura 49 - Autenticação no Api Gateway	76
Figura 50 - Arquivo <i>nats-server.conf</i>	77
Figura 51 - Inicialização do servidor <i>NATS</i> com seu respectivo arquivo de configuração	77
Figura 52 - Esquema de um serviço com usuário e senha para conexão com o <i>NATS</i>	78
Figura 53 - Ferramenta <i>mkpasswd</i> para encriptar a senha	78
Figura 54 - Arquivo <i>nats-server.conf</i> com senha criptografada	78
Figura 55 - Log de conexão de um serviço com o transporter <i>NATS</i>	79
Figura 56 - Geração chave com o método <i>guard.generate</i> com o parâmetro <i>daq</i>	80
Figura 57 - Esquema do serviço <i>DAQ</i> com <i>JWT</i>	80
Figura 58 - Painel frontal do <i>LabVIEW</i> ilustrando os componentes da planta piloto	82
Figura 59 - Resposta de controle de todas as malhas da planta	83
Figura 60 - Malha de controle de pressão da tubulação	84
Figura 61 - <i>GET.vi</i>	85
Figura 62 - Painel frontal do <i>LabVIEW</i> utilizado para orquestração dos serviços	86

Figura 63 - Diagrama de bloco do LabVIEW contendo uma requisição.	86
Figura 64 - Diagrama da sequência de orquestração	87
Figura 65 - Diagrama da sequência de orquestração externa	88
Figura 66 - Diagrama da sequência de orquestração interna.....	89
Figura 67 - Diagrama da sequência de coreografia externa	90
Figura 68 - Diagrama da sequência de coreografia interna.....	91
Figura 69 - Gráfico do tempo de controle de todas as composições testadas.	92
Figura 70 - Molecular Benchmark.....	93
Figura 71 - Comparação de diferentes tipos de <i>transporters</i> mantendo a estrutura do experimento de orquestração com aplicação externa (subseção 5.2.1) analisando o tempo total.	94
Figura 72 - Comparação de diferentes tipos de mecanismos de segurança usando como referência a mesma padronização do experimento de orquestração com aplicação externa (subseção 5.2.1).....	95
Figura 73 - Painel de Frontal de Controle da Planta Piloto	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Esquema das Propriedades dos Microserviços	40
Tabela 2 - Configurações no ServiceBroker.....	41
Tabela 3 - Quantidade e descrição dos principais itens da planta-piloto industrial	57
Tabela 4 - Orquestração externa com transportador NATS	88
Tabela 5 - Orquestração interna com transportador NATS.....	89
Tabela 6 - Coreografia externa com transportador NATS	90
Tabela 7 - Coreografia interna com transportador NATS	91

LISTA DE SIGLAS E DEFINIÇÕES

SIGLA	DESCRIÇÃO
AMQP	<i>Advanced Message Queuing Protocol</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
CLI	<i>Command Line Interface</i>
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
DB	<i>Data Base</i>
HTTP	<i>Hyper Text Transfer Protocol</i>
HTTPS	<i>Hyper Text Transfer Protocol Secure</i>
I2C	<i>Inter Integrated Circuit</i>
I4.0	<i>Industry 4.0</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISA	<i>International Society of Automation</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
JWT	<i>JSON Web Token</i>
MOA	<i>Microservice Oriented Architecture</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
MV	<i>Manipulated Variable</i>
NATS	<i>Messaging System</i>
NPM	<i>Node Package Manager</i>
P&ID	<i>Piping and Instrumentation Diagram/Drawing</i>
PID	<i>Proportional Integral Derivative</i>
PM2	<i>Process manager</i>
PV	<i>Process Variable</i>
REST	<i>Representational State Transfer</i>
RPC	<i>Remote Procedure Call</i>
RSA	<i>Rivest-Shamir-Adleman</i>
SOA	<i>Service Oriented Architecture</i>
SSH	<i>Secure Shell</i>
SSL	<i>Secure Socket Layer</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TLS	<i>Transport Layer Security</i>
URL	<i>Uniform Resource Locator</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	16
1.1	Objetivos.....	19
1.2	Estrutura do Trabalho	19
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1	Revolução Industrial	21
2.2	Indústria 4.0	22
2.3	Arquitetura Orientada a Serviços.....	24
2.4	Arquitetura Orientada a Microserviços	26
2.4.1	Orquestração.....	28
2.4.2	Coreografia.....	29
2.5	Aplicações Industriais	30
2.6	Segurança	32
3	FRAMEWORK MOLECULAR.....	35
3.1	Serviço	39
3.2	Transporter	42
3.3	Gateway	42
3.4	Ações	42
3.5	Métodos	45
3.6	Eventos	45
3.7	Exemplificação fluxo de solicitação do usuário	49
4	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	51
4.1	Planta-Piloto Industrial baseada em Serviços	51
4.2	Hardware	54
4.3	Softwares	57
4.3.1	Serviços	57
4.3.1.1	Transportador	57
4.3.1.2	Gateway.....	58
4.3.1.3	Controle.....	59
4.3.1.4	Aquisição de dados.....	62
4.3.1.5	Base de dados e Monitoramento	62
4.3.1.6	Rastreador.....	65
4.3.2	Replicação de serviços	66

4.3.3	Gerenciador de processos	67
4.4	Diagrama de Conexão	68
4.5	Segurança	70
4.5.1	Acesso à Raspberry Pi com Cliente SSH	70
4.5.2	HTTPS e Autenticação/Autorização	74
4.5.3	Autenticação ao conectar-se com transportador NATS	76
4.5.4	Microserviço de Guarda com JSON <i>Web Token</i>	79
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
5.1	Controle das Malhas de Processo.....	83
5.2	Orquestração	85
5.2.1	Aplicação Externa	85
5.2.2	Aplicação Interna	89
5.3	Coreografia	90
5.3.1	Aplicação Externa	90
5.3.2	Aplicação Interna	90
5.4	Comparação	91
5.4.1	Composição de serviços	91
5.4.2	Protocolos de Mensagens (<i>Transporters</i>).....	92
5.4.3	Mecanismos de Segurança	94
6	CONCLUSÃO	97
7	REFERÊNCIAS	99
8	APÊNDICE	103
8.1	Procedimento de Operação da Planta Piloto	103

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A manufatura tem evoluído até chegar em sua versão 4.0, integrando novas tecnologias objetivando maior eficiência. Para Lu (2017), a I4.0 (Indústria 4.0) retrata uma evolução dos sistemas produtivos a partir da convergência entre tecnologias da automação (TA) e tecnologia da informação (TI). 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, Internet das Coisas e inteligência de dados, dentre outras inovações. 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 I4.0.

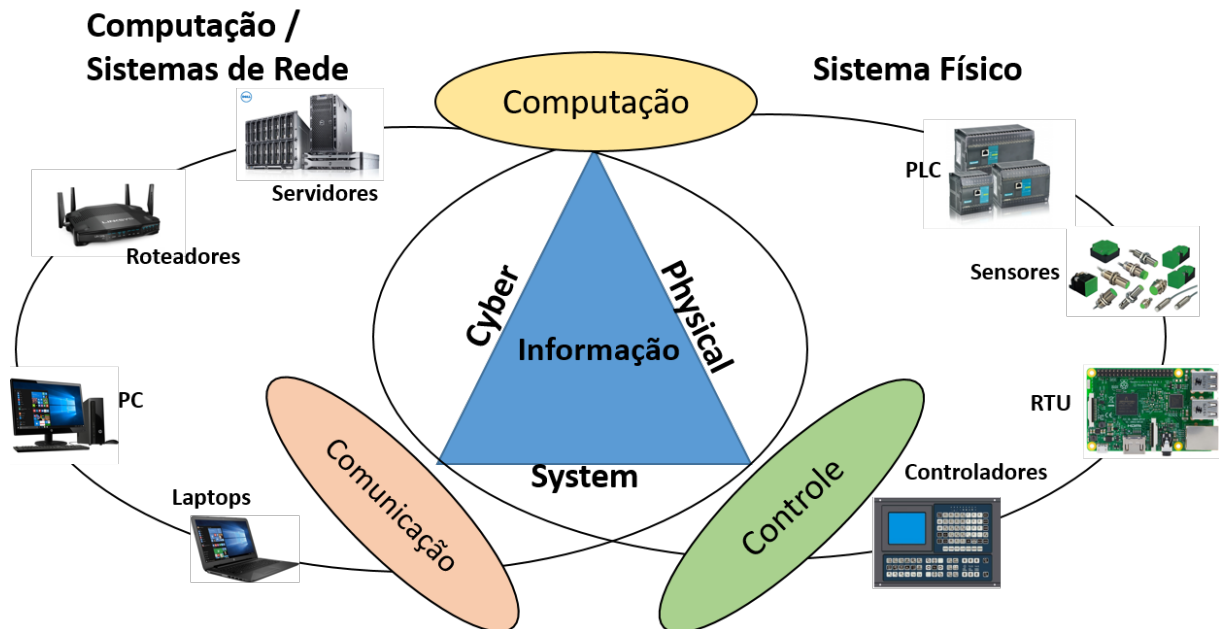
Um primeiro exemplo dessa convergência entre TI e TA foi a criação do gêmeo digital, cuja primeira definição foi feita em 2002 por Michael Grieves no contexto de uma apresentação da indústria sobre a gestão do ciclo de vida do produto. O gêmeo digital representa a interconexão e convergência entre um sistema físico e sua representação digital, incluindo de forma otimizada todas as informações relativas ao sistema que poderiam ser obtidas do mundo real (KRITZINGER et al., 2018; RAZA et al. 2020).

Um segundo exemplo dessa junção entre TI e TA, é o surgimento do termo “Sistema Cyber-Físico (CPS)” que foi proposto em 2006 por um grupo de pesquisadores da fundação americana NSF (*National Science Foundation*), com o propósito de descrever a integração entre dispositivos de controle com a computação e redes de comunicação como pode ser visto na Figura 1. Ao lado esquerdo temos a computação ou sistemas de rede que englobam computadores, roteadores, servidores e ao lado direito o sistema físico, com os controladores lógicos programáveis (PLC), sensores e controladores. Na parte central temos o espaço cyber físico fazendo uma afluência entre os dois mundos, tendo seus três principais pilares, computação, comunicação e controle, dos quais compartilham todas as informações.

Os CPS são sistemas com capacidade computacional que estão conectados com dispositivos do mundo físico e os processos que os cercam, ao mesmo tempo que fornecem e consomem serviços de dados disponíveis na Internet (KANG et al., 2016). De acordo com Colombo et al. (2017), os dispositivos de campo, máquinas, módulos de produção e produtos são compreendidos como CPS que trocam informações de forma autônoma, acionando ações e controlando umas às outras de forma independente. Para Hermann et al. (2016), o CPS,

para se adequar aos requisitos da I4.0, deve abranger clientes, máquinas, produtos, estoques e prestadores de serviço, de forma que interajam executando ações autonomamente.

Figura 1 - Integração entre Dispositivos de Controle com a Computação e Comunicação em um sistema cyber físico.



Fonte: BIGHETI (2020).

Os CPS dependem da integração perfeita de algoritmos computacionais e componentes físicos. A fim de tornar esses sistemas interoperáveis entre si para suportar as novas aplicações da Indústria 4.0, novas arquiteturas industriais têm sido desenvolvidas. Um paradigma recente para a indústria tem sido o desenvolvimento de soluções colaborativas por meio do uso e compartilhamento de serviços para obtenção de uma arquitetura flexível, escalável, interoperável, distribuída e totalmente integrada em rede. Nesse sentido, o desenvolvimento de arquiteturas orientadas a serviços (SOA – *Service Oriented Architecture*) para a aplicação da I4.0 tem se destacado conforme descrito em Jammes et al. (2014).

Colombo et al. (2014) discutem o conceito de uma arquitetura de automação baseada no uso da Computação em Nuvem e de Serviços Web (*Web Services*) para comunicação e realização das tarefas entre os diferentes componentes e equipamentos de um sistema industrial. Nessa arquitetura, um sistema de armazenamento de informações em nuvem é compartilhado pelos equipamentos e sistemas, tornando possível o uso de serviços padronizados para comunicação entre os mesmos. Os serviços podem ser acessados por aplicações, sistemas e outros serviços independentemente de onde eles estão alocados (hardware, software e rede de comunicação), propiciando uma arquitetura colaborativa.

Delsing (2017) exhibe o conceito de nuvem de automação local, no qual os componentes e dispositivos de automação são disponibilizados como serviços, provendo interoperabilidade total para aplicações industriais. Neste projeto toda a infraestrutura de integração e comunicação foi realizada através de uma Arquitetura Orientada a Serviços (SOA), desenvolvida com o *Framework Arrowhead*. Leitão et al. (2016) discute algumas iniciativas financiadas pela União Europeia sobre aplicações industriais de SOA, onde são apresentadas as arquiteturas SOA desenvolvidas e discutidas implementações e casos de estudo onde estas arquiteturas foram validadas.

Ciavotta et al. (2017) apresentam uma proposta de Arquitetura Orientada a Microserviços (MOA) para fomentar a implantação do conceito de fábrica digital. Microserviços representam uma evolução do conceito de SOA. O foco é o desenvolvimento de aplicações de I4.0 e possui como diferencial o suporte para a simulação de processos industriais e criação de gêmeos digitais.

O panorama apresentado demonstra a importância da pesquisa e desenvolvimento de SOA e MOA, para fornecer os novos requisitos das aplicações industriais no contexto da I4.0. Mais significativo é a discussão de resultados experimentais obtidos com o desenvolvimento e implementação dessas arquiteturas, os quais permitam avaliar questões práticas relacionados ao desempenho, confiabilidade e dificuldades deste tipo de aplicação.

Diante desse contexto, esta pesquisa propõem complementar o estudo desenvolvido por Bigheti, Fernandes e Godoy (2019) que propõem uma nova abordagem para Indústria 4.0 com a uma arquitetura de automação baseada em microserviços para aplicações da I4.0. Uma arquitetura de microserviços consiste em uma coleção de pequenos serviços autônomos, onde cada serviço é independente e implementa uma única funcionalidade. Este trabalho visa desenvolver serviços e analisar os resultados dessa arquitetura usando diferentes tipos de composição de microserviços em aplicações de controle de processos no cenário da Indústria 4.0. Pretende-se realizar testes reais sobre essa arquitetura com diferentes tipos de composição, questões de segurança, estabilidade, escalabilidade e redundância aplicados em uma planta piloto industrial, bem como o desenvolvimento de serviços para o controle de processos de todas as suas malhas de controle: nível tanque, vazão de linha, pressão linha e pressão reservatório.

1.1 Objetivos

Este trabalho objetiva o desenvolvimento e testes operacionais de microsserviços e mecanismos de segurança para aplicações de controle de processos na Indústria 4.0, além da avaliação de desempenho da composição de microsserviços por Orquestração e Coreografia. O desenvolvimento de uma planta piloto industrial de controle de processos utilizando uma arquitetura orientada a microsserviços (MOA) baseada no framework *Molecular*, a qual é utilizada para o desenvolvimento experimental do trabalho, também é descrita.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho de mestrado possui mais sete capítulos, além deste capítulo introdutório que contém o contexto, justificativa e objetivos desta pesquisa. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura sobre a revolução industrial, conceitos e tecnologias relacionadas à Indústria 4.0, bem como são discutidos as arquiteturas SOA e MOA, diferentes composição de serviços, coreografia e orquestração, as principais aplicações industriais que contem esse tipo de arquitetura, além de aspectos de segurança em arquiteturas baseadas em serviços.

O Capítulo 3 apresenta o *framework Molecular*, utilizado para a criação de microsserviços na plataforma *Node.js*, explicando seus principais pontos: o que é um serviço; Para que é necessário um transportador de mensagens; Serviço *api gateway* padrão; Ações, métodos e eventos de um microsserviço; Exemplo de fluxo de solicitação do usuário para uma visualização geral de como o *framework* trabalha e interage com todos os elementos de sua estrutura.

No Capítulo 4 é descrita a proposta desse trabalho de mestrado, que envolve o desenvolvimento de uma planta piloto industrial de controle de processos com o intuito de realizar testes mais aprofundados da arquitetura orientada a microsserviços na indústria 4.0. Todos os *hardwares* e *softwares* utilizados na planta são apresentados. O desenvolvimento dos microsserviços Aquisição de Dados (DAQ), Controle PID*Plus*, Rastreador para métricas, Base de dados e monitoramento de processo, e Segurança de acesso (Guarda) é detalhado, além de como fazer a replicação dos serviços e gerenciá-los e na sequência uma visão geral de como o *hardware* e *software* estão distribuídos e realizam sua comunicação exibidos em um diagrama de conexão. Alguns mecanismos de segurança são aplicados na estrutura: Acesso do desenvolvedor aos microsserviços via chave criptografada; Requisições HTTPS; Autenticação de

usuários com *token*; Opções de conexão com o transportador de mensagens NATS; Serviço de guarda de controle de acesso entre microsserviços com JSON *Web Token*.

O Capítulo 5 apresenta os resultados dos diversos experimentos realizados nesse trabalho, contemplando discussões sobre a comparação entre a composição de microsserviços por Orquestração e Coreografia, aplicações externas e internas, comparação entre diferentes tipos de transportador de mensagens na arquitetura e sobre o impacto da implementação dos mecanismos de segurança.

As conclusões são apresentadas no Capítulo 6. No Capítulo 7 estão as referências bibliográficas e por último Capítulo 8 os procedimentos básicos de Operação da Planta Piloto.

6 CONCLUSÃO

Aplicações da indústria 4.0 que empregam a arquitetura orientada a microsserviços garantem a interoperabilidade e integração vertical entre todas as camadas do sistema manufatureiro, tendo como principais características uma estrutura modular e distribuída. Essa arquitetura vem consolidando-se, mostrando interesse em pesquisas e desenvolvimentos. Suas funcionalidades e seus benefícios voltados para aplicações no contexto da I4.0 foram discutidas bem como os detalhes operacionais e da estrutura utilizada, comunicação, composição dos serviços e segurança.

O desenvolvimento dos microsserviços e aplicações propostas neste trabalho foram apresentados, bem como o framework *Molecular* para a criação dos mesmos, que simplifica a implantação de uma arquitetura orientada a microsserviços, uma vez que toda a infraestrutura computacional não precisou ser desenvolvida, reduzindo o tempo de desenvolvimento permitindo que o foco fosse dado ao desenvolvimento dos microsserviços e aplicações voltadas para automação e controle. Detalhes operacionais de uma planta piloto de controle de processos onde esses microsserviços foram aplicados, com quatro possíveis variáveis de controle com instrumentos e equipamentos industriais usando uma arquitetura orientada a serviços foram discutidos. Foi possível criar os microsserviços para o controle da planta como API Gateway, aquisição de dados, controle, guarda, base de dados para monitoramento e rastreador para métricas de tempo.

Além dos microsserviços, diversos experimentos foram realizados para a validação da arquitetura. A malha de pressão de linha foi utilizada como base, utilizando a plataforma desenvolvida, onde os mesmos serviços utilizados para controle da malha citado, podem ser replicados para o controle de todas as malhas da planta.

O primeiro experimento buscou analisar, se utilizando diferentes tipos de composição, surtiriam algum impacto na performance do controle, como a orquestração e coreografia tanto internamente utilizando apenas o *transporter* como externamente utilizando o api gateway. Os resultados demonstraram que quanto menos rotas os serviços têm que realizar mais eficazes são como no caso da coreografia que apresentaram melhores resultados.

Um segundo teste, verificou se variando os tipos de *transportes*, surtiria algum efeito no tempo de controle. A variação de protocolos de comunicação também impacta o desempenho de comunicação, sendo que *transporter* usando TCP foi o que apresentou o melhor resultado na comunicação serviço a serviço em relação ao NATS e MQTT que utilizam um *broker*.

Por último, testes analisaram o desempenho da comunicação com a implantação dos mecanismos de segurança desenvolvidos, de forma isolada e em conjunto. Apesar de exercerem impacto no desempenho de comunicação, conclui-se que devem ser escolhidos de acordo com o projeto pois também impactam em questões de segurança que são essenciais para aplicações industriais.

Além dos experimentos percebeu-se uma das desvantagens em relação ao modo monolítico no decorrer do projeto, sendo que a arquitetura orientada a microsserviços requer muito mais passos na comunicação para ser executada, pois todas as suas funcionalidades estão desacopladas e distribuídas em microsserviços distintos, aumentando o tempo final de controle, porém nos testes realizados demonstra que mesmo assim, está dentro dos padrões industriais aceitáveis.

Em contrapartida, as vantagens se sobressaem, pois a composição de microsserviços aprimora a flexibilidade e a modularidade de aplicativos industriais, e sua replicação, simplificando a criação de novos serviços. Além disso, já fornece acesso a todas as informações do processo, o que facilita o desenvolvimento de aplicativos de monitoramento e manutenção.

Todos experimentos demonstrados nesta pesquisa indicam que a arquitetura orientada a microsserviços é favorável quanto ao desenvolvimento de soluções para a I4.0. Tópicos relacionados à versionamento, redundância e containerização, não abordados, oferecem possibilidades para pesquisas em novos horizontes.

7 REFERÊNCIAS

- ARROWHEAD TOOLS. **Arrowhead Tools for Engineering of Digitalisation Solutions**, 2019. Disponível em: <https://cordis.europa.eu/project/id/826452>. Acesso em: Abril, 2020.
- ARROWHEAD. **The Arrowhead Framework**, 2014. Disponível em: <https://www.arrowhead.eu/>. Acesso em: Abril, 2020.
- BANGEMANN T, KARNOUSKOS S, CAMP R, CARLSSON O, RIEDL M, MCLEOD S, HARRISON R, COLOMBO AW, STLUKA P. **State of the art in industrial automation**. Industrial cloud-based cyber-physical systems Springer International Publishing, Switzerland, ch 2, 2014, pp. 23–47.
- BASSI, L. **Industry 4.0: Hope, hype or revolution?**. In: INTERNATIONAL FORUM ON RESEARCH AND TECHNOLOGIES FOR SOCIETY AND INDUSTRY (RTSI), 3., 2017, Modena. Proceedings. Piscataway: IEEE, 2017. p. 1-6. DOI: 10.1109/RTSI.2017.8065927. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8065927>. Acesso em: 08 fev. 2019.
- BIGHETI, J. A.; FERNANDES, M. M.; GODOY, E. P. **Control as a Service: A Microservice Approach to Industry 4.0**. 2019 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd 4.0 and IoT 2019 - Proceedings. Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1 jun. 2019
- BIGHETI, J. A.; RISSO, S. L.; CALDIERI, M. R.; GODOY, E. P. **Proposta de Arquitetura Orientada a Microserviços para Aplicações de Internet das Coisas Industrial**. In: XXII Congresso Brasileiro de Automática, 2018, João Pessoa. Anais do CBA 2018. Campinas: SBA, 2018.
- BIGHETI, J.A.; CALDIERI, M.R.; GODOY, E.P. **Automação e controle de processos na nuvem**: proposta e estudo de caso. In: Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Vitória, ES, 2018.
- BLEVINS, T; NIXON, M. AND WOJSZNIS, W. **PID Control Using Wireless Measurements**. American Control Conference (ACC), June 4-6, 2014. p. 1-6.
- BORANGIU, T.; TRENTESAUX, D.; THOMAS, A.; LEITÃO, P.; BARATA, J. **Digital transformation of manufacturing through cloud services and resource virtualization**. Computers in Industry, Amsterdam, v. 108, p. 150-162, Jun. 2019. DOI: 10.1016/j.compind.2019.01.006. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361519300107>. Acesso em: 09 set. 2019.
- CIAVOTTA, M.; ALGE, M.; MENATO, S.; ROVERE, D.; PEDRAZZOLI, P. **A Microservice-based Middleware for the Digital Factory**. Procedia Manufacturing, Vol. 11, 2017, pp. 931-938.
- COLOMBO, A. W, KARNOUSKOS, S. BANGEMANN, T. **Towards the Next Generation of Industrial Cyber-Physical Systems**. In: Bangemann T, Karnouskos S, Delsing J, Stluka P, Harrison R, Jammes F, Lastra JL (eds), Ch 1, Industrial cloud-based cyber-physical systems. Springer International Publishing, Switzerland, 2014, pp 01–22.
- COLOMBO, A. W, KARNOUSKOS, S., O. KAYNAK, Y. SHI, S. YIN. **Industrial Cyber-physical Systems: A Backbone of the Fourth Industrial Revolution**. In: IEEE Industrial Electronics Magazine, March 2017.

Como funciona o SSH. Disponível em: <<https://www.hostinger.com.br/tutoriais/como-funciona-o-ssh/>>. Acesso em: 18 nov. 2020.

DELSING, J. **IoT Automation Arrowhead Framework**. CRC Press, 440 p., 2017.

FATTORI, C. C.; JUNQUEIRA, F.; SANTOS FILHO, D. J. DOS; MIYAGI, P. E. **Service composition modeling using interpreted Petri net for system integration**. In: IEEE International Conference on Mechatronics, 2011, pp. 696-701.

FOWLER, M. **Microservices a definition of this new architectural term**, 2014. Disponível em: <https://martinfowler.com/articles/microservices.html>. Acesso em: fevereiro, 2020.

Grafana. Disponível em: <<https://grafana.com/>>. Acesso em: 19 jun. 2020.

HTTPS vs. HTTP: O que é um site seguro e um fator de classificação? | Botify. Disponível em: <<https://www.botify.com/blog/what-is-a-secure-website-https-vs-http>>. Acesso em: 18 nov. 2020.

IMC-AESOP Project. (2011). **IMC-AESOP Project**. Disponível em: <http://www.imcaesop.eu>. Acesso em: Novembro, 2020.

INNERBICHLER, I.; GONUL, S.; DAMJANOVIC-BEHRENDT, V.; MANDLER, B.; STROHMEIER, F. **NIMBLE collaborative platform: Microservice architectural approach to federated IoT**. Global Internet of Things Summit (GloTS), Geneva, 2017, pp. 1-6.

JAZDI, N. **Cyber physical systems in the context of Industry 4.0**. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATION, QUALITY AND TESTING, ROBOTICS, AQTR, 2014, Cluj-Napoca. Proceedings [...]. Piscataway: IEEE, 2014. p. 1-4. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6857843>. Acesso em: 24 nov. 2018

JSON Web Tokens - jwt.io. Disponível em: <<https://jwt.io/>>. Acesso em: 14 fev. 2020.

jsonwebtoken - npm. Disponível em: <<https://www.npmjs.com/package/jsonwebtoken>>. Acesso em: 14 fev. 2020.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0**. Acatech, n. April, p. 13-78, 2013.

KARNOUSKOS, S.; COLOMBO, A.W.; BANGEMANN, T.; MANNINEN, K.; CAMP, R.; TILLY, M.; SIKORA, M.; JAMMES, F.; DELSING, J.; ELIASSON, J.; NAPPEY, P.; HU, J.; GRAF, M. **The IMC-AESOP Architecture for Cloud-Based Industrial Cyber-Physical Systems**. In: Colombo A. et al. (eds) Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems. Springer, Cham, 2014.

KOKKONIS, G.; CHATZIMPARMPAS, A.; KONTOGIANNIS, S. **Middleware IoT protocols performance evaluation for carrying out clustered data**. South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference, SEEDA_CECNSM 2018. Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 26 nov. 2018.

LEITÃO, P.; COLOMBO, A.W.; KARNOUSKOS, S. **Industrial automation based on cyber-physical system Technologies: Prototype implementations and challenges**. Computers in Industry. Vol. 81, September 2016, pp. 11-25.

LEWIS, J; FOWLER, M. **Microservices**. Martin Fowler, 2014. Disponível em: <https://martinfowler.com/articles/microservices.html>. Acesso em: 10 abr. 2020.

LU, Y. **Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues**. Journal of Industrial Information Integration, v. 6, p. 1–10, 2017.

MAKSUTI, S.; TAUBER, M.; DELSING, J. **Generic Autonomic Management as a Service in a SOA-based Framework for Industry 4.0**. IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference). Anais...IEEE Computer Society, 1 out. 2019.

MAYA. (2019). **The MAYA Project**. Disponível em: <http://www.maya-euproject.com/>. Acesso em: Janeiro, 2020.

MOLECULER. (2020). **Fast & powerful microservices framework for Node.js**. Disponível em: <https://moleculer.services/>. Acesso em: janeiro, 2020.

MORAES, E. C. **Desenvolvimento de padrões de interfaces para integração de sistemas heterogêneos na manufatura**. Salvador, 2017. 247f. Tese (Doutorado - Engenharia Industrial) – Universidade Federal da Bahia, PEI, 2017.

NAIK, N. **Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP**. 2017 IEEE International Symposium on Systems Engineering, ISSE 2017 - Proceedings. Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 26 out. 2017

NEHME, A. et al. **Securing Microservices**. IT Professional, v. 21, n. 1, p. 42–49, 1 jan. 2019.

NEWMAN, S. **Building Microservices**. O'Reilly Media, Inc. CA: Gravenstein, 2015.

NIMBLE. **The NIMBLE Project**. Disponível em: <https://www.nimble-project.org/>. Acesso em: janeiro, 2020.

PAHL, M. O.; DONINI, L. **Securing IoT microservices with certificates**. IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium: Cognitive Management in a Cyber World, NOMS 2018. Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 6 jul. 2018.

PM2. Disponível em: <https://pm2.keymetrics.io/>. Acesso em: 19 fev. 2020.

PRODUCTIVE 4.0. **Productive 4.0 Project Website**. Disponível em: <https://productive40.eu/>. Acesso em: abril, 2020.

Raspberry Pi Stackable Card for Industrial Automation. Disponível em: https://sequentmicrosystems.com/index.php?route=product/product&path=20&product_id=52. Acesso em: 19 jun. 2020.

RAZA, M. et al. **A Digital Twin Framework for Industry 4.0 Enabling Next-Gen Manufacturing**. ICITM 2020 - 2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management. Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1 fev. 2020

RICHARDSON, C.; SMITH, F. **Microservices From Design to Deployment**. NGINX, 2016. Disponível em: <https://www.nginx.com/resources/library/designing-deploying-microservices/>. Acesso em: Janeiro, 2020

SANDERS, A.; ELANGESWARAN, C.; WULFSBERG, J. **Industry 4.0 implies lean manufacturing: research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing**. Journal of Industrial Engineering and Management, v. 9, n. 3, p. 811-833, 2016.

SHENG, Q. Z.; QIAO, X.; VASILAKOS, A. V.; SZABO, C.; BOURNE, S.; XU, X. **Web services composition: A decade's overview**. Information Sciences, v. 280, October 2014, pp. 218– 238.

SISINNI, Emiliano et al. **Industrial internet of things: challenges, opportunities, and directions**. IEEE Transactions on Industrial Informatics, Piscataway, v. 14, n. 11, p. 4724-4734, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/tii.2018.2852491>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8401919> Acesso em: 16 ago. 2018.

SONG, J.; MOK, A.; CHEN, C.; NIXON, M.; BLEVINS, T.; WOJSZNIS, W. **Improving PID control with unreliable communications**. *Paper presented at the ISA EXPO Technical Conference*. Houston, Texas, October 17-19, 2006.

SOUT, S.; FATTORI, C. C.; JUNQUEIRA, F.; FILHO, D. J. S.; MIYAGI, P. E. **Orchestrating dispersed productive systems**. In: IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA, Anais.2013.

STOCK, T.; SELIGER, G. **Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0**. Procedia CIRP. Anais. Elsevier B.V., 1 jan. 2016.

KOKKONIS, G.; CHATZIMPARMPAS, A.; KONTOGIANNIS, S. **Middleware IoT protocols performance evaluation for carrying out clustered data**. South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference, SEEDA_CECNSM 2018. Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 26 nov. 2018.

SUEDA, Y.; SATO, M.; HASUIKE, K. **Evaluation of Message Protocols for IoT**. Proceedings - 2019 IEEE/ACIS 4th International Conference on Big Data, Cloud Computing, and Data Science, BCD 2019. Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1 maio 2019.

SUN, Y.; NANDA, S.; JAEGER, T. **Security-as-a-service for microservices-based cloud applications**. Proceedings - IEEE 7th International Conference on Cloud Computing Technology and Science, CloudCom 2015. Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1 fev. 2016.

WANG, L.; WANG, G. **Big data in cyber-physical systems, digital manufacturing and Industry 4.0**. International Journal of Engineering and Manufacturing (IJEM), v. 6, n. 4, p. 1-8, 2016.

WOLLSCHLAEGER, M.; SAUTER, T.; JASPERNEITE, J. **The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0**. IEEE Industrial Electronics Magazine, [s.l.], v. 11, n. 1, p.17-27, mar. 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/mie.2017.2649104.

XIAO, Z.; WIJEGUNARATNE, I.; QIANG, X. **Reflections on SOA and Microservices**. In: 4th IEEE International Conference on Enterprise Systems, 2016, pp. 60-67.