MARCOS ANDRÉ PISCHING

Arquitetura para descoberta de equipamentos em processos de
manufatura com foco na Indústria 4.0

São Paulo
2018

MARCOS ANDRÉ PISCHING

Arquitetura para descoberta de equipamentos em processos de
manufatura com foco na Indústria 4.0

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências.

São Paulo
2018

MARCOS ANDRÉ PISCHING

Arquitetura para descoberta de equipamentos em processos de
manufatura com foco na Indústria 4.0

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de
Controle e Automação Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Junqueira

São Paulo
2018

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Pisching, Marcos André

Arquitetura para descoberta de equipamentos em processos de manufatura com foco na Indústria 4.0 / M. A. Pisching -- versão corr. -- São Paulo, 2018.

188 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Automação industrial 2.Arquitetura Orientada a serviços 3.Redes de Petri 4.Internet das Coisas 5.Manufatura I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

Dedico este trabalho à minha fiel companheira Patrícia Freitas Betiatto pela compreensão e apoio incondicional em todos os momentos que se passaram durante essa fase de muitas incertezas e desafios, mas também de muitas conquistas e realizações.

Aos meus pais Erfriedo Bruno Pisching (*in memoriam*) e Sirlei Pisching, que com dignidade e presteza me ensinaram a importância da família, do comprometimento com os nossos deveres, da persistência e da honestidade.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e por tudo mais que tem me concedido ao longo dela.

Ao professor Dr. Fabrício Junqueira pela orientação, motivação e pelos conselhos. Também pela paciência e dedicação para o esclarecimento das dúvidas e incertezas que surgiram durante a realização deste trabalho. Aprendi com ele que o 'não' nós já temos e precisamos persistir indo sempre em busca do 'sim'.

Ao professor Dr. Paulo Eigi Miyagi pelas orientações para a elaboração do projeto de doutorado e pelo apoio técnico na escrita de artigos científicos publicados ao longo deste projeto.

Ao Marcosiris Pessoa pelo apoio e contribuições nos experimentos práticos realizados no LSA.

Ao Edson Watanabe pela amizade, dicas e conselhos ao longo desses anos.

Às servidoras Marisa e Regianne da secretaria do PPGEM pelo apoio acadêmico e administrativo.

Do programa DINTER USP/IFSC, agradeço aos coordenadores pela organização e realização do projeto, e aos professores pelos ensinamentos e compartilhamento de experiências.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento do programa DINTER.

Aos colegas do DINTER que em muito contribuíram, principalmente durante o curso das disciplinas ofertadas pelo programa.

Aos servidores do Campus Lages do IFSC pelo apoio e motivação para a realização deste trabalho.

Aos colegas do Campus Tubarão do IFSC que me acolheram pelo processo de remoção, justamente na etapa final do desenvolvimento deste projeto.

À minha esposa Patrícia pelo apoio e incentivo, principalmente nos momentos de turbulência do trabalho, e também pela compreensão pelas faltas cometidas devido a dedicação ao desenvolvimento deste trabalho. Não posso deixar de reconhecer e de agradecer pela preocupação e os cuidados em torno do nosso bem-estar e de nossa saúde.

Aos meus pais Erfriedo Bruno Pisching (*in memoriam*) e Sirlei Pisching pela educação e o apoio incondicional que sempre me deram para o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus sogros Ariovaldo e Mônica pelo incentivo para a realização deste trabalho.

Aos meus irmãos, amigos, parentes e a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a execução deste projeto.

*“Não fiz o melhor,
mas fiz tudo para que o melhor fosse feito.*

*Não sou o que deveria ser,
mas não sou o que era antes.”*

Martin Luther King

RESUMO

A Indústria 4.0, ou quarta revolução industrial, é o atual cenário industrial que estabelece um novo paradigma para os sistemas de produção. A indústria 4.0 é compreendida como a implementação da fábrica inteligente que opera de forma mais autônoma e com menor intervenção humana, cujo propósito é prover serviços e produtos inteligentes que atendam às necessidades individuais dos consumidores. A Indústria 4.0 está amparada nos sistemas ciber-físicos (CPS) e na Internet das Coisas (IoT). Neste cenário máquinas e produtos se comunicam entre si visando automatizar os processos industriais por meio de informações individuais obtidas em tempo real durante os processos de manufatura. No entanto, a Indústria 4.0 e as pesquisas em torno desse assunto ainda são muito recentes e requerem mais investigações no que diz respeito às arquiteturas que suportem a sua implementação, entre elas a comunicação entre produtos e máquinas. Neste quesito, recentemente foi proposto o modelo de arquitetura de referência para a Indústria 4.0 (RAMI 4.0) com o objetivo de nortear a implementação deste tipo de sistema. Contudo, o RAMI 4.0 ainda requer esforços no campo da pesquisa sob diferentes aspectos, entre eles a integração vertical de recursos do sistema de produção. Neste sentido, este trabalho objetiva apresentar uma arquitetura para a descoberta de equipamentos para processar operações conforme as necessidades dos produtos. A arquitetura foi projetada em camadas baseadas no RAMI 4.0 para prover componentes que permitam a comunicação entre equipamentos e produtos, e um mecanismo similar ao sistema de nomes de domínios (DNS – *Domain Name System*) para realizar a descoberta de equipamentos para processar uma determinada operação. Nessa arquitetura as informações dos equipamentos são armazenadas em uma estrutura organizada hierarquicamente para auxiliar o serviço de descoberta, e os produtos possuem informações das operações necessárias para o processo de manufatura. Para garantir a eficácia do funcionamento dos componentes e suas interações, é necessário a verificação e validação por meio de métodos formais. Neste trabalho a verificação e validação é realizada por meio da técnica PFS (*Production Flow Schema*)/RdP (Rede de Petri). Por fim, a arquitetura é aplicada em um sistema de produção modular para demonstrar a sistemática de implementação e a sua efetividade.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Internet das Coisas. Production Flow Schema. RAMI 4.0. Rede de Petri. Sistemas Ciber-Físicos.

ABSTRACT

The Industry 4.0, also known as fourth industrial revolution, is the current industrial scenario that sets a new paradigm for production systems. The Industry 4.0 can be understood as the implementation of the smart factory that operates more autonomously and with less human intervention. The purposes of it is to provide smart products and services that meet the consumer individual needs. The Industry 4.0 is supported by cyber-physical systems (CPS) and Internet of Things (IoT). In this scenario machines and products communicate with each other to automate industrial processes through individual information that are obtained in real time during manufacturing processes. However, the researches around this issue are still very recent and require further investigations with regard of to the architectures that support its implementation, including communication between products and equipment. Taking into account this problem, a Reference Architectural Model for Industry 4.0 (RAMI 4.0) was recently proposed with the purpose to guide the implementation of this system type. However, the RAMI 4.0 still requires efforts in different aspects, including the vertical integration of resources of the production systems. In this sense, this work aims to present an architecture for the discovery of equipment to process operations according to the product needs. The architecture was designed based on layers of the RAMI 4.0 to provide components that allow communication between equipment and products and a Web Service that offer a mechanism similar to the Domain Name System (DNS) to locate equipment to process a required operation. In this architecture the capable operations supported by the equipment are stored in a structure organized hierarchically to aid the discovery service, and the products have information of the operation required for the manufacturing process. In order to guarantee the effectiveness of the component functionalities and their interactions it is necessary to verify and validate them by formal methods. In this work the Production Flow Schema (PFS)/Petri Net (PN) technique is used to develop the conceptual and functional modeling of the architecture. Finally the architecture is applied in a modular production system to demonstrate its implementation systematics and its effectiveness.

Keywords: Cyber-Physical Systems. Industry 4.0. Internet of Things. Petri Net. Production Flow Schema. RAMI 4.0.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – As revoluções industriais.....	22
Figura 2 – Comunicação entre “coisas”, isto é, entre os elementos envolvidos no sistema produtivo sobre uma infraestrutura baseada na <i>Internet</i>	25
Figura 3 – Principais conceitos e tecnologias envolvidos nesta pesquisa com suas relações.....	34
Figura 4 – Estrutura e componentes básicos de um CPS.....	44
Figura 5 – Indústria 4.0 baseada na IoT, nos CPSs e computação em nuvem para atender exigências personalizadas do consumidor.....	47
Figura 6 – A Indústria 4.0 e seus principais participantes em ambiente colaborativo amparado pelas TIC.....	48
Figura 7 – Indústrias, empresas e organizações parceiras digitalizam seus processos industriais e serviços físicos.....	49
Figura 8 – Consumidores requisitam serviços por meio de interfaces apropriadas, a partir das quais os serviços são compostos para atender as especificidades das demandas.....	49
Figura 9 – Ambientes integrados para projetos e criação de produtos por engenheiros e equipes de pesquisa e desenvolvimento, com a coparticipação do consumidor....	51
Figura 10 – Sensores e atuadores interagem com produtos e suas representações virtuais.....	52
Figura 11 – Elementos da fábrica inteligente.....	54
Figura 12 – Os CPSs, a IoT, os serviços e a computação em nuvem no contexto da I4.0.....	55
Figura 13 – Parceiros digitalizam, publicam e compartilham seus recursos físicos como serviços virtuais de modo a prover soluções para atender demandas específicas de mercado.....	58
Figura 14 – Elementos, estruturas e fluxos de modelos PFS.....	61
Figura 15 – Exemplos de RdP: (a) representação de um modelo PFS em RdP; (b) a abordagem da fusão de transição para compor modelos em RdP.....	62
Figura 16 – Arquitetura em camadas da IoT.....	66
Figura 17 – IoT-ARM - Modelo de arquitetura de referência para IoT.....	69
Figura 18 – Arquitetura em 4 camadas da IoT.....	72
Figura 19 – Modelo de referência em 7 camadas para IoT.....	74

Figura 20 – RAMI 4.0.	76
Figura 21 – Representação de Componente da Indústria 4.0 (I4.0C).	79
Figura 22 – A relação de um I4.0C com o eixo ‘ Camadas ’ do RAMI 4.0.....	80
Figura 23 – “Coisas” com seus respectivos ASs que podem ser geridos por um sistema integrado chamado de SAS.....	81
Figura 24 – Os componentes da arquitetura organizados sobre o eixo ‘ Camadas ’ do RAMI 4.0.	92
Figura 25 – Organização da base de dados RHE - Rede Hierárquica de Equipamentos.	96
Figura 26 – As tabelas TOE e TLE utilizadas para a descoberta de equipamento para processar. operações.....	97
Figura 27 – Exemplo de um esquema para representar os PVs e PAs.	100
Figura 28 – As interações entre os componentes da arquitetura para a descoberta de equipamento para processar operações.	101
Figura 29 – Fluxograma pré-operação – fluxo para determinar o encaminhamento do produto em processo de manufatura.....	103
Figura 30 – Fluxograma das verificações na TOE e na TLE.....	105
Figura 31 – Fluxo para atualizar a “ <i>Situação</i> ” da operação processada no produto.	107
Figura 32 – Fluxograma pós-operação - fluxo para atualizar a “ <i>Situação</i> ” da operação processada no produto.....	108
Figura 33 – Modelo em PFS dos componentes da arquitetura e suas interações. .	111
Figura 34 – Refinamento da atividade [Mundo Físico] (a partir da Figura 33).	112
Figura 35 – Exemplo de um esquema representado pelo o PFS da Figura 34.	112
Figura 36 – Refinamento da atividade [Ponto de Verificação] (a partir da Figura 34).....	113
Figura 37 – Refinamento da atividade [Configuração Operação] (a partir da Figura 36).....	114
Figura 38 – Refinamento da atividade [DGOM] (a partir da Figura 37).....	114
Figura 39 – Refinamento da atividade [CPO] e o respectivo refinamento da atividade [Processa o pedido] e suas interações com [PPO], [SLE] e [CE] (a partir da Figura 38).....	115
Figura 40 – Refinamento da atividade [PPO] (a partir da Figura 39).	116

Figura 41 – Refinamento da atividade [SLE] (a partir da Figura 39).	118
Figura 42 – Refinamento da atividade [Realiza busca na TLE] que representa o mecanismo de busca na TLE (a partir da Figura 41).	118
Figura 43 – Refinamento da atividade [CE] (a partir da Figura 39).	119
Figura 44 – Refinamento da atividade [SDDC] (a partir da Figura 37).	119
Figura 45 – Refinamento da atividade [Ponto de Atualização] (a partir da Figura 34).	120
Figura 46 – Refinamento da atividade [Atualiza Operação] (a partir da Figura 45).	120
Figura 47 – Refinamento da atividade [DGOM] em relação a atividade [AOP] (a partir da Figura 46).	121
Figura 48 – Refinamento da atividade [AOP] (a partir da Figura 47).	121
Figura 49 – Modelagem em RdP das atividades [Mundo Físico], [Ponto de Verificação], [Configura Operação], [DGOM], [SDDC] e [CPO] (da Figura 34 a Figura 39).	123
Figura 50 – Modelagem em RdP das interações entre a atividade [Processa o pedido] com as atividades [PPO], [SLE] e [CE] (Referente os modelos em PFS: Figura 39, Figura 40, Figura 41 e a Figura 43).	126
Figura 51 – Modelo em RdP das operações para executar a busca de um equipamento pela atividade [Realiza busca na TLE] (a partir da Figura 42 e da Figura 50)	127
Figura 52 –RdP da atividade [Ponto de Atualização] e as interações, por meio da fusão de redes, com [DGOM], [SDDC] e [AOP] (da Figura 45 a Figura 48).	129
Figura 53 – Módulo de Teste de produtos.	133
Figura 54 – Módulo de Processamento de produtos.	133
Figura 55 – Módulo de Classificação de produtos.	134
Figura 56 – Esquema da configuração dos componentes baseado em um MPS da Festo.	135
Figura 57 – Definição dos elementos essenciais para a descoberta de equipamentos no sistema de produção.	138
Figura 58 – Um esquema dos elementos da RHE com as respectivas TOE e TLE (a partir do SP da Figura 57).	140

Figura 59 – Produtos utilizados nos experimentos.....	141
Figura 60 – Esquema dos elementos da RHE com as respectivas TOE e TLE após o processamento das operações.	150
Figura 61 – Metodologia para desenvolvimento da pesquisa.	167
Figura 62 – Ciclo do desenvolvimento utilizado neste projeto de pesquisa.	168
Figura 63 – Ilustração de uma arquitetura baseada em RAMI 4.0.	180
Figura 64 – Arquitetura Básica para a localização e resolução de serviços IoT.	182
Figura 65 – Expansão da camada Entidades e Serviços em Nuvem (ESN) apresentando as subcamadas para a localização de serviços nas entidades virtuais.	183
Figura 66 – Organização hierárquica presente na OFEVS	184
Figura 67 – Organização Hierárquica das Entidades Digitalizadas.....	187
Figura 68 – Representação das tabelas para localização de Entidades Digitalizadas.	188

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição das camadas do modelo de referência da IoT segundo IoTWF (2014).....	75
Tabela 2 – Descrição do eixo vertical 'Camadas' do RAMI 4.0.	78
Tabela 3 – Um exemplo do conteúdo do CORPP.....	98
Tabela 4 – Descrição dos elementos do sistema produtivo.	139
Tabela 5 – Lista das operações exigidas pelos produtos.....	141
Tabela 6 – TOE e TLE dos equipamentos na RHE.....	141
Tabela 7 – CORPP do Produto 1.	141
Tabela 8 – CORPP do Produto 1 após iniciar processo OP_x.....	142
Tabela 9 – CORPP do Produto 1 após o processamento da operação OP_x.	142
Tabela 10 – CORPP do Produto 2.	142
Tabela 11 – CORPP do Produto 2 após iniciar a operação OP_x.	142
Tabela 12 – CORPP do Produto 2 após o processamento da operação OP_x.	142
Tabela 13 – CORPP do Produto 2 após iniciar a operação OP_y.	143
Tabela 14 – CORPP do Produto 2 após o processamento da operação OP_y.	143
Tabela 15 – CORPP do Produto 3.	143
Tabela 16 – Atualização da TLE do EQP_1 na RHE.	143
Tabela 17 – CORPP do Produto 3 após iniciar a operação OP_y.	144
Tabela 18 – CORPP do Produto 3 após concluir a operação OP_y.	144
Tabela 19 – CORPP do Produto 3 após concluir a operação OP_v.	144
Tabela 20 – CORPP do Produto 4.	144
Tabela 21 – Atualização da TLE do EQP_1 na RHE com a operação OP_z.....	144
Tabela 22 – CORPP do Produto 4 após o processamento das operações.....	145
Tabela 23 – CORPP do Produto 5.	145
Tabela 24 – CORPP do Produto 5 após o processamento das operações OP_y e OP_w.	145
Tabela 25 – CORPP do Produto 6.	146
Tabela 26 – Atualização da TLE do EQP_1 na RHE com a operação OP_v.....	146
Tabela 27 – CORPP do Produto 7.	146
Tabela 28 – Atualização da TLE do EQP_2 na RHE com a operação OP_w.	146
Tabela 29 – CORPP do Produto 7 após o processamento das operações.....	146
Tabela 30 – CORPP do Produto 8.	147

Tabela 31 – Atualização da TLE do EQP_1 na RHE com a operação OP_w.	147
Tabela 32 – CORPP do Produto 8 após o processamento das operações.....	147
Tabela 33 – CORPP do Produto 9.	148
Tabela 34 – Atualização da TLE do EQP_1 na RHE com a operação OP_n.....	148
Tabela 35 – CORPP do Produto 9 após o processamento das operações OPx, OP_z e OP_n.	148
Tabela 36 – CORPP do Produto 10.	148
Tabela 37 – Atualização da TLE do EQP_3 na RHE com a operação OP_m.....	149
Tabela 38 – CORPP do Produto 10.	149
Tabela 39 – Cronograma das atividades a serem desenvolvidas ao longo do programa de doutorado.	172
Tabela 40 – Artigo apresentado no DoCEIS'2015.....	173
Tabela 41 – Artigo apresentado no COBEM 2015.	174
Tabela 42 – Artigo apresentado no ETFA 2016.	175
Tabela 43 – Artigo apresentado no CBA 2016 (a).....	175
Tabela 44 – Artigo apresentado no CBA 2016 (b).....	176
Tabela 45 – Artigo apresentado no SBAI 2017.	177
Tabela 46 – Artigo publicado na revista <i>Computers & Industrial Engineering</i>	177

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

Sigla	Descrição
AOP	Atualiza Operação Processada
API	<i>Application Program Interface</i>
ARM	<i>Architectural Reference Model</i>
AS	<i>Administration Shell</i>
BF	<i>Buffer</i>
CE	Configuração do Equipamento
CLP	Controlador Lógico Programável
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
CORPP	Controle de Operações Requisitadas pelo Produto
CPO	Configura Próxima Operação
CPPS	<i>Cyber-Physical Production Systems</i>
CPS	<i>Cyber-Physical Systems</i>
DC	Dispositivo de Controle
DGOM	Driver para Gerenciamento de Operações de Manufatura
DHT	<i>Distributed Hash Table</i>
DNS	<i>Domain Name System</i>
EID	Identificação Única do Equipamento
EM	Equipamentos e Máquinas
EPC	<i>Electronic Product Code</i>
EPoSS	<i>European Technology Platform on Smart Systems</i>
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
EQP	Equipamento
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
EV	Entidade Virtual
FPM	Fim do Processo de Manufatura
GF	Grupo Funcional
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GS	Gerenciador de Serviço
HMI	<i>Human-Machine Interface</i>
HTTP	<i>HyperText Transfer Protocol</i>
I4.0	<i>Industry 4.0</i>
I4.0C	<i>Industry 4.0 Component</i>
IaaS	<i>Infrastructure as a Service</i>
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
IIC	<i>Industrial Internet Consortium</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
IIRA	<i>Industrial Internet Reference Architecture</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IoT-A	<i>IoT-Architecture</i>
IoT-ARM	<i>IoT-Architectural Reference Model</i>
IoTDS	<i>Internet of Things, Data and Services</i>
IoTWF	<i>IoT World Forum</i>
IPM	Início do Processo de Manufatura
IPv6	<i>Internet Protocol version 6</i>
JEE	<i>Java Enterprise Edition</i>
M2M	<i>Machine to Machine</i>

MES	<i>Manufacturing Execution System</i>
MPS	<i>Modular Production System</i>
MAR	Modelo de Arquitetura de Referência
NFC	<i>Near Field Communication</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
OFEVS	Organização Federada de Entidade Virtual e Serviço
OLE	<i>Object Linking and Embedding</i>
ONS	<i>Object Naming Service</i>
OP	Operação
OPC UA	<i>OPC Unified Architecture</i>
PA	Ponto de Atualização
PaaS	<i>Platform as a Service</i>
PFS	<i>Production Flow Schema</i>
PID	Identificação Única do Produto
PME	Pequenas e Médias Empresas
PPO	Pesquisa Próxima Operação
PV	Ponto de Verificação
RAMI 4.0	<i>Reference Architectural Model for Industry 4.0</i>
RCS	Rede Colaborativa de Serviços
RdP	Rede de Petri
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RHE	Rede Hierárquica de Equipamentos
RM-OSI	<i>Reference Model for Open Systems Interconnection</i>
SaaS	<i>Software as a Service</i>
SAS	<i>System Administration Shell</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SDDC	Servidor de Dados do Dispositivo de Controle
SDK	<i>Software Development Kit</i>
SED	Sistemas a Eventos Discretos
SGAM	<i>Smart Grid Architecture Model</i>
SLE	Serviço de Localização de Equipamento
SLEVS	Serviço de Localização de Entidades Virtuais do Serviço
SOA	<i>Service Oriented Architecture</i>
SOAP	<i>Simple Object Access Protocol</i>
SOC	<i>Service Oriented Computing</i>
SP	Sistema Produtivo
SPD	Sistema Produtivo Disperso
SSC	Servidor de Serviço Central
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
TLE	Tabela de Localização de Equipamento
TOE	Tabela das Operações do Equipamento
UDDI	<i>Universal Description, Discovery, and Integration</i>
UID	<i>Unique Identification</i>
UML	<i>Unified Modelling Language</i>
URI	<i>Universal Resource Identifier</i>
USP	Universidade de São Paulo
UUID	<i>Universal Unique Identification</i>
W3C	<i>World Wide Web Consortium</i>
WS	<i>Web Services</i>
WS_GOM	Web Service para Gerenciamento de Operações de Manufatura

WS-BPEL	<i>WS – Business Process Execution Language</i>
WS-CDL	<i>WS –Choreography Description Language</i>
WSDL	<i>Web Service Description Language</i>
WS-REST	<i>WS – Representational State Transfer</i>
XML	<i>eXtensible Markup Language</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS	29
1.1.1	Objetivo Geral	29
1.1.2	Objetivos Específicos	30
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	31
2	INDÚSTRIA 4.0: TECNOLOGIAS E RECURSOS CONSIDERADOS PARA SUA IMPLEMENTAÇÃO	33
2.1	SERVIÇOS	33
2.1.1	Arquitetura Orientada a Serviços e Serviços Web	34
2.1.2	Composição de serviços	37
2.1.3	Procura e Resolução de Serviços	38
2.2	INTERNET DAS COISAS (IoT)	40
2.3	SISTEMAS CIBER-FÍSICOS	42
2.3.1	Tecnologia OPC UA	44
2.4	INDÚSTRIA 4.0	45
2.4.1	Cenário global	47
2.4.2	Fábrica Inteligente	52
2.4.3	IoT, CPS e fábrica inteligente no contexto da Indústria 4.0	54
2.4.4	Serviços e a Indústria 4.0	56
2.4.5	Sistemas Baseados na Computação em Nuvem e a Indústria 4.0	57
2.5	MODELAGEM DE SISTEMAS COM A TÉCNICA <i>PRODUCTION FLOW SCHEMA</i> E REDE DE PETRI	60
2.6	SÍNTESE DO CAPÍTULO	62
3	MODELOS DE ARQUITETURAS DE REFERÊNCIA PARA IOT E I4.0	64
3.1	CONCEITOS DE ARQUITETURA E ARQUITETURA DE REFERÊNCIA	64
3.2	ARQUITETURA EM 5 CAMADAS PARA IOT	65
3.3	IOT-ARM	68
3.4	ARQUITETURA BASEADA EM SERVIÇOS COM FOCO NA IOT	71
3.5	MODELO DE ARQUITETURA DE REFERÊNCIA DA CISCO, IBM E INTEL	73
3.6	RAMI 4.0	73
3.7	PRINCIPAIS PESQUISAS EM TORNO DA I4.0, IOT E CPS	81
3.7.1	Pesquisas baseadas em CPS, IoT e Serviços	81
3.7.2	Pesquisas sobre localização e resolução de “coisas” da IoT e OPC-UA	82
3.7.3	Considerações sobre as pesquisas relatadas	85
3.8	SÍNTESE DO CAPÍTULO	87

4	ARQUITETURA PARA DESCOBERTA DE EQUIPAMENTO E PROCESSAMENTO PERSONALIZADO DE OPERAÇÕES.....	91
4.1	COMPONENTES DA ARQUITETURA	91
4.2	ESTRUTURA DA RHE	96
4.3	CONTROLE DAS OPERAÇÕES REQUISITADAS PELO PRODUTO.....	97
4.4	INTERATIVIDADE ENTRE OS COMPONENTES DA ARQUITETURA	99
4.4.1	Procedimento para processar uma operação.....	99
4.4.2	Procedimento para a descoberta de equipamentos	104
4.4.3	Procedimento para atualizar a Situação do produto processado.....	106
4.5	SÍNTESE DO CAPÍTULO	108
5	MODELAGEM CONCEITUAL E FUNCIONAL DOS PROCESSOS.....	111
5.1	MODELAGEM CONCEITUAL DOS PROCESSOS.....	111
5.2	MODELAGEM FUNCIONAL USANDO REDE DE PETRI.....	122
5.3	SÍNTESE DO CAPÍTULO	130
6	EXEMPLO DE APLICAÇÃO.....	132
6.1	MPS	132
6.2	IMPLEMENTAÇÃO.....	134
6.2.1	Implementação dos componentes.....	134
6.2.2	Identificação dos produtos	137
6.2.3	Organização e distribuição dos elementos físicos do sistema de produção	137
6.2.4	Definição da RHE.....	138
6.3	EXPERIMENTOS	140
6.3.1	Manufatura do Produto 1 (P1)	141
6.3.2	Manufatura do Produto 2 (P2)	142
6.3.3	Manufatura do Produto 3 (P3)	143
6.3.4	Manufatura do Produto 4 (P4)	144
6.3.5	Manufatura do Produto 5 (P5)	145
6.3.6	Manufatura do Produto 6 (P6)	145
6.3.7	Manufatura do Produto 7 (P7)	146
6.3.8	Manufatura do Produto 8 (P8)	147
6.3.9	Manufatura do Produto 9 (P9)	147
6.3.10	Manufatura do Produto 10 (P10)	148
6.3.11	RHE atualizada após o processamento das operações	149
6.4	SÍNTESE DO CAPÍTULO	149
7	CONCLUSÕES	152
7.1	TRABALHOS FUTUROS.....	154
	REFERÊNCIAS.....	156

APÊNDICE A – Materiais e metodologia de pesquisa	167
APÊNDICE B – Publicações decorrentes da pesquisa	173
APÊNDICE C – Arquitetura e modelo de referência de arquitetura	178
APÊNDICE D – Arquitetura baseada em modelos de referência para IoT.....	182

1 INTRODUÇÃO

A indústria é o setor da economia que produz bens materiais por meio de diferentes recursos, entre eles humanos, energia e equipamentos altamente mecanizados e automatizados (LASI et al., 2014). Desde o início da industrialização, os sistemas produtivos sofrem transformações que são influenciadas pelos avanços tecnológicos, pelas demandas de mercado e também pelo surgimento de novas técnicas e modelos de negócios. Essas transformações envolvem os processos industriais e têm seus períodos marcados pelas chamadas revoluções industriais que, de certa forma, alavancaram o progresso humano por meio de novas formas de geração de energia, técnicas de produção em massa e processamento de informações (CHANTANAYINGYONG, 2016; SCHWAB, 2016). A Figura 1 apresenta um panorama das revoluções industriais. A primeira aconteceu no final do século XVIII e foi marcada pela mecanização da produção por meio do uso da água e vapor como fonte de energia (SCHUH et al., 2014a) quando, em 1784, surge o primeiro tear mecânico. A segunda, no século XX, foi marcada pela produção em massa baseada na divisão do trabalho onde a mecanização usa a eletricidade como fonte de energia (SCHUH et al., 2014a). A terceira foi caracterizada pela introdução da eletrônica e as tecnologias da informação e comunicação (TIC), com componentes eletrônicos que propiciaram maior automação industrial por meio de recursos programáveis, tais como CNC (*Computer Numeric Control*), CLP (Controlador Lógico Programável) e robôs (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013; SCHUH et al., 2014a). O século XXI está sendo marcado pelo largo uso das TIC e alavancada principalmente pelo uso da *Internet* (BRETTEL et al., 2014). Assim, o recente período é caracterizado pelos sistemas ciber-físicos (CPSs¹ – *Cyber-Physical Systems*) e a introdução da *Internet* das Coisas (IoT – *Internet of Things*) na indústria, o que transforma a maneira de

¹ CPS – é uma sigla para *Cyber-Physical Systems* que remete à pluralidade de sistemas. No entanto, são encontradas muitas divergências relacionadas ao seu uso nas publicações correlatas, no sentido de que ora se refere a pluralidade de sistemas ora a singularidade, por exemplo: “*Cyber physical systems are open sociotechnical systems and permit a number of innovative functions, services and characteristics.*” (DORST et al., 2016); “*Cyber-physical systems (CPS) are enabling technologies...*” (MACDOUGALL, 2014); “*A cyber-physical system is a physical object with an embedded system containing computing power (a CPU), data storage and a form of network connectivity.*” (BECHTOLD et al., 2014); “*Cyber-Physical Systems (CPSs) are characterized by integrating computation and physical processes.*” (SHI et al., 2011). Em algumas referências a sigla é utilizada para ambos os casos, por exemplo: em Hermann; Pentek e Otto (2016) são encontradas as seguintes colocações, “*CPS are integrations of computation and physical processes...*”, e “*One example of a CPS ...*”. Portanto nesse trabalho o termo **CPS** é usado em referência a um sistema ciber-físico, enquanto **CPSs** faz menção a sistemas cyber-físicos.

pensar, projetar e desenvolver os sistemas produtivos, ou seja, uma verdadeira revolução vindo a culminar em um novo período no setor industrial denominado de quarta revolução industrial (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

Figura 1 – As revoluções industriais.

Fonte: O autor.

A quarta revolução industrial é conhecida como Indústria 4.0, inicialmente denominada *Industrie 4.0*, pelo fato de o termo ter sido apresentado pela primeira vez na Alemanha, em 2011, na feira de Hannover e lançado oficialmente em abril de 2013 (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013; MACDOUGALL, 2014). O termo Indústria 4.0 (I4.0) nasceu de uma iniciativa estratégica de aplicação de alta tecnologia liderada pelo ministério federal de educação e pesquisa² do governo da Alemanha como parte de um plano de ação para elevar a automatização dos sistemas produtivos (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013). Sendo a Alemanha o berço da I4.0, o seu governo financia um projeto denominado “Plataforma para Indústria 4.0” (do alemão *Plattform Industrie 4.0*³), cujo propósito é desenvolver recomendações que sejam disponíveis em uma estrutura consistente e confiável para todas as partes interessadas (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013; SCHUH et al., 2014b). O

² Federal Ministry of Education and Research (do alemão *Bundesministerium für Bildung und Forschung*)
- <https://www.bmbf.de/en/index.html>

³ <http://www.plattform-i40.de>

projeto tem a cooperação do IIC⁴ (*Industrial Internet Consortium*) dos Estados Unidos da América, do AIF⁵ (*Alliance Industrie du Futur*) da França e do RRI⁶ (*Robot Revolution Initiative*) do Japão. Adicionalmente, os membros da plataforma para I4.0 desenvolvem um plano de ação em conjunto com a China⁷.

De acordo com Kagermann e Riemensperger (2014), a I4.0 pode ser entendida como a implementação da fábrica inteligente (*smart factory*) e está centrada na manufatura baseada em serviços e processos inteligentes. A fábrica inteligente busca inovar os processos produtivos e atender as flutuações das demandas, assim como permitir a oferta de produtos personalizados que atendam às necessidades individualizadas de clientes. Estes fatores mudam significativamente os conceitos de produção, visando agora a produção sob demanda e personalizada ao invés da produção em massa (PISCHING et al., 2015a). A I4.0 é considerada uma nova era industrial com o propósito de atender aos anseios e as flutuações do mercado mundial, que se torna possível por meio das TIC, *Internet* móvel e ubíqua, sensores de dimensões menores a baixos custos e mais potentes, assim como a inteligência artificial e máquinas que aprendem (CHANTANAYINGYONG, 2016). Essa nova era é apresentada por Brynjolfsson e McAfee (2014), que afirmam que o setor produtivo mundial está sendo impulsionado por três fatores principais, sendo eles: (1) o crescimento exponencial da capacidade dos computadores; (2) a vasta coleção de informações digitais; e (3) as inovações tecnológicas. Trata-se de uma visão digitalizada, onde as informações do ciclo de vida dos produtos e dos processos de produção são compartilhados em rede. As informações referentes aos projetos, arquiteturas, prototipagens, testes, estoques, manuais de equipamentos e produtos, normas, manutenções, descartes e tantas outras operações, devem ser arquivadas em formatos digitais, de modo que possam ser recuperadas e compartilhadas entre as partes interessadas a qualquer momento e em qualquer lugar. Os interesses dos consumidores e as flutuações de mercado intensificam a demanda por indústrias que possam responder rapidamente às expectativas dos mesmos, uma vez que há uma crescente tendência pela busca de produtos cujo ciclo de vida é menor e ao mesmo

⁴ <http://www.iiconsortium.org/>

⁵ <http://allianceindustrie.wixsite.com/industrie-dufutur>

⁶ <https://www.jmfrri.gr.jp/english/>

⁷ <http://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/EN/InPractice/Deutsch-Chinesische-Kooperation/Deutsch-Chinesische-Kooperation.html>

tempo em que há um aumento da procura de produtos sob medida que satisfaçam as intenções do cliente.

No contexto da I4.0 é esperado que máquinas e produtos se comuniquem por meio dos CPSs e a IoT para trocar informações entre eles ao longo do ciclo de produção (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013; HENG, 2014; LASI et al., 2014; MACDOUGALL, 2014; SCHUH et al., 2014a). Os CPSs fornecem uma rede integrada de processos e recursos para permitir a integração dos sistemas físicos com os virtuais por meio da *Internet* (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013; MACDOUGALL, 2014), onde sistemas embarcados (*embedded system*⁸) monitoram e controlam processos físicos por meio de sensores e atuadores com operações do tipo pedido/resposta, fazendo com que processos físicos afetem os virtuais e vice-versa. De acordo com Kang et al. (2016) um CPS passa a ser uma tecnologia chave para a concepção da manufatura inteligente (*smart manufacturing*) acompanhada de outras tecnologias, tais como a computação em nuvem, a IoT e *big data*⁹ (megadados).

Por outro lado, a IoT pode ser vista como uma infraestrutura de rede global e dinâmica composta por dispositivos conectados baseados em sensores, redes de comunicação, e tecnologias de processamento de informação (XU; HE; LI, 2014), que permitem o rastreamento e monitoramento de “coisas”, sejam elas virtuais ou físicas. Neste contexto, os CPSs conectados via *Internet* são compreendidos como elementos da IoT (JAZDI, 2014), isto é, os CPSs oferecem a base para a criação de um ambiente IoT, que combina a *Internet* dos serviços e dados para tornar possível a Indústria 4.0 (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

No contexto da I4.0, os CPSs são parte das “coisas” da IoT, que por sua vez são definidas como uma rede de “coisas” que cooperam uns com os outros por meio de endereços únicos e exclusivos. Nesse contexto, os CPSs proporcionam a

⁸ *Embedded System* – Um sistema embarcado é sistema computacional que faz parte de outros sistemas normalmente designados para executar algum tipo de função específica. Este sistema é embutido (embarcado) em um dispositivo que inclui *hardware* (componentes mecânicos e eletrônicos). Um sistema embarcado é capaz de monitorar e controlar processos físicos, usualmente com funções repetitivas onde os processos físicos afetam os computacionais e vice-versa. São exemplos de sistemas embarcados: computador de bordo de automóveis; rastreadores de veículos de carga; sistemas de controle de processos industriais; etc. (CRNKOVIC; IVICA, 2005; LEE; SESHIA, 2017). Segundo Monostori et al. (2016), os sistemas embarcados marcam a origem dos sistemas ciber-físicos (CPS).

⁹ *Big Data* – É uma expressão utilizada globalmente para se referir a grandes volumes de dados organizados e disponibilizados em uma infraestrutura de rede (*Internet*) que são utilizados para prever tendências e auxiliar na tomada de decisões em diferentes áreas do conhecimento.

digitalização dos recursos e serviços físicos, além de oferecer maior autonomia da produção por meio da comunicação entre produtos e máquinas do sistema de produção (KAGERMANN; RIEMENSBERGER, 2014; HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016). De acordo com Kagermann e Riemensperger (2014) a digitalização de serviços físicos é o meio para o compartilhamento de recursos de modo a propiciar redes colaborativas de serviços. O compartilhamento de recursos virtuais segue a arquitetura orientada a serviços (SOA – *Service Oriented Architecture*) e é implementada por meio de serviços *Web* (WS – *Web Services*).

De acordo com Kagermann; Wahlster e Helbig (2013), na I4.0 as pessoas, as máquinas, as matérias-primas e os produtos devem se comunicar entre si, assim como pessoas se comunicam em uma rede social (Figura 2). Desta forma, os recursos físicos devem ser digitalizados, precisando que sejam criados, publicados e compartilhados em uma infraestrutura baseada na *Internet*, para serem então utilizados por uma determinada empresa ou grupo de parceiros que visam atender a uma demanda específica.

Figura 2 – Comunicação entre “coisas”, isto é, entre os elementos envolvidos no sistema produtivo sobre uma infraestrutura baseada na *Internet*.

Fonte: O autor.

Neste cenário os produtos possuem identificadores exclusivos que são chaves para a localização de suas próprias informações, tais como, características, destino e

lista de operações a serem realizadas, permitindo que possam ser monitorados e controlados de forma autônoma durante os processos de manufatura (LASI et al., 2014). Os produtos com essas características são baseados na IoT e são chamados de produtos inteligentes (*smart products*), apresentando como principal característica a capacidade de serem monitorados e rastreados, oferecendo informações que vão desde o processo produtivo até o pós-venda (GUTIERREZ et al., 2013). De acordo com McFarlane et al. (2013), os produtos inteligentes no contexto industrial compreendem a ligação de um produto ou pedido físico às informações e regras que coordenam a forma com que estes são manufaturados, armazenados e/ou transportados. Ainda, para McFarlane et al. (2013), uma abordagem que segue o paradigma de produto inteligente é descrita como a capacidade de tratar cada produto individualmente, dependendo de suas características e necessidades específicas. Assim sendo, os produtos inteligentes são considerados subcomponentes dos CPSs, principalmente pela capacidade de comunicação com o ambiente de produção (BECHTOLD et al., 2014; HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016). Portanto, na I4.0 os recursos do setor produtivo devem se comunicar, e neste quesito, para Kagermann; Wahlster e Helbig (2013) os fabricantes de ferramentas e máquinas para o setor produtivo devem se preparar para compatibilizar a comunicação entre máquinas e produtos, sendo necessário a especificação de normas e arquiteturas que possam servir de base para a implementação da I4.0. Vale destacar que, segundo Hermann; Pentek e Otto (2016), a I4.0 apresenta seis princípios de projeto que requerem atenção e que são os desafios para sua consolidação, sendo eles: (1) a interoperabilidade, (2) a digitalização, (3) a descentralização, (4) a coleta e análise de dados em tempo real, (5) a orientação a serviços, e (6) a modularidade.

A I4.0 deve ser provida de ferramentas e máquinas que se comuniquem em tempo real com bases de dados, sistemas operacionais, e outras ferramentas. Para isso há a necessidade da interação do mundo real com o virtual de forma que os equipamentos possam se comunicar e processar operações de acordo com os requisitos dos produtos com mínima intervenção humana, evidenciando assim novas oportunidades no campo da pesquisa e desenvolvimento (MACDOUGALL, 2014; UNGUREAN; GAITAN; GAITAN, 2014).

Quanto às arquiteturas de sistemas produtivos voltadas à quarta revolução industrial, é fato que estas se apresentam em estágio inicial, e por este motivo muitos assuntos são explorados no campo de pesquisa e entre eles está a necessidade da

comunicação entre máquinas e produtos baseados nos conceitos de CPS e IoT, para possibilitar o processamento de operações de manufatura de forma mais autônoma. De acordo com Xu; He e Li (2014), normas técnicas e arquiteturas precisam ser estabelecidas para definir as especificações para processamento e troca de informações entre “coisas”. Para Bandyopadhyay e Sen (2011), o sucesso da IoT no contexto industrial depende de normatizações e arquiteturas que visem amparar a implantação de sistemas com suporte à comunicação entre recursos do sistema produtivo oferecendo autonomia, interoperabilidade, compatibilidade, confiabilidade e operações eficazes em uma escala global.

De acordo com os estudos realizados em torno da I4.0, constata-se uma série de expectativas para atingir sua maturidade e se tornar realidade, dentre as quais se destacam:

- a) A criação de produtos personalizados e sob demanda para atender interesses individuais de consumidores.
- b) A indústria precisa ser ágil para atender as demandas personalizadas, ou seja, ao invés da produção em massa, a produção deve ser individualizada e as máquinas precisam ter autonomia para identificar quais são os processos que devem executar sobre os produtos presentes na linha de produção, levando em conta as especificidades de cada produto.
- c) As empresas, diante de um contexto globalizado, independente de tamanho, mas em especial as pequenas e médias empresas (PME), devem ter maior participação nos negócios por meio da prestação de serviços em redes colaborativas, ao mesmo tempo que as exigências individuais de consumidores devem potencializar a competição entre as empresas. A busca por soluções que venham a contribuir para o processo produtivo industrial e atender a demandas personalizadas requer uma indústria mais ágil. A formação de redes colaborativas de serviços (RCS) é uma forma de viabilizar a colaboração entre empresas e parceiros para prover soluções personalizadas aos seus clientes. Estas empresas podem estar localizadas muito próximas fisicamente ou dispersas, isto é, espalhadas pelo mundo.
- d) O uso da IoT como forma de permitir a comunicação entre produtos e máquinas de modo que cada peça receba o tratamento adequado durante os processos de produção e auxilie no desenvolvimento de produtos personalizados. Ainda, com o avanço da miniaturização dos componentes eletrônicos e o crescimento da

infraestrutura da *Internet*, a computação ubíqua tem se fortalecido e está se tornando realidade. Elementos computacionais passam a fazer parte de pequenos componentes eletrônicos capazes de enviar, receber, processar e armazenar informações de forma autônoma, em qualquer lugar, desde que haja meios de comunicação providos pela *Internet*.

- e) A digitalização dos serviços físicos e a disponibilização dos mesmos em uma infraestrutura baseada na computação em nuvem permite o compartilhamento de serviços. Estes serviços, no contexto da IoT e CPS são usados em diferentes momentos, como por exemplo, na engenharia de projetos de plantas industriais, na criação de produtos, em ambientes virtuais de ensino/treinamento, em sistemas de manutenção à distância, entre outros. A implementação e gerenciamento dos serviços são realizados por intermédio da arquitetura orientada a serviços (*Service Oriented Architecture – SOA*) e implementado por meio de serviços Web (*Web Services – WS*).

Os anseios que giram em torno da Indústria 4.0, presentes nas recomendações descritas por Kagermann; Wahlster e Helbig (2013), assim como a necessidade de arquiteturas e serviços apresentados por Kagermann e Riemensperger (2014) reforçam a motivação para a realização de pesquisas sobre novas arquiteturas de sistemas produtivos e sua implementação prática. Em especial, nota-se que não há evidências de pesquisas e publicações que tratam de soluções para determinar objetivamente qual equipamento deve ser alocado para processar operações conforme os requisitos do produto. Os modelos de referências apresentam os detalhes sobre conceitos, normas e interações, porém é possível observar que não asseguram os detalhes de implementação e procedimentos de aplicação, tão pouco sugerem um meio de organizar e localizar equipamentos e dados para dar suporte à descoberta e seleção de máquinas para processar as operações exigidas pelos produtos.

As propostas de arquiteturas para comunicação entre produtos e equipamentos envolvidos na linha de produção industrial requerem mais investigações de modo a viabilizar que as operações exigidas para a manufatura de produtos possam, de forma autônoma, serem identificadas e utilizadas para determinar a máquina para processá-las.

O desenvolvimento de uma arquitetura de sistema como a que se propõe neste trabalho, envolve a modelagem conceitual e funcional do sistema para,

respectivamente, verificar e validar os componentes e a dinâmica da interação entre eles, que pode ser realizado por meio da simulação. De acordo com Pessoa (2015), a simulação possibilita a realização de uma análise comportamental do modelo e assim verificar e validar se ele atende aos requisitos funcionais. Também é importante destacar que a comunicação entre produtos e máquinas, assim como a descoberta de equipamentos são classificadas como sistemas a eventos discretos (SED). Segundo Miyagi (1996) uma técnica formal efetiva para a modelagem de SED é a rede de Petri (RdP), que possibilita também a visualização do sistema em diferentes níveis de abstração. Da RdP deriva a técnica *Production Flow Schema* (PFS) que é um grafo interpretado para a modelagem conceitual de sistemas (PESSOA et al., 2014). De acordo com da Silva et al. (2012), o PFS é efetiva para sistematizar e facilitar a modelagem em RdP de processos de sistemas produtivos. Segundo Hasegawa et al. (1999), um importante recurso do PFS é a representação do fluxo de diferentes tipos de itens (objetos físicos, mensagens, dados, etc.) e o processo de alocação e desalocação de recursos. Por meio de PFS é possível fazer uma representação hierárquica do modelo por meio de sucessivos refinamentos que resultam em modelos em RdP, que são utilizados para verificar e validar os comportamentos do sistema por meio da simulação. A técnica PFS/RdP oferece a base para a modelagem de arquiteturas de *software*, possibilitando a descrição das funcionalidades específicas de componentes e também da interação entre eles.

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos com base nos estudos realizados e as motivações que levaram ao desenvolvimento desta pesquisa.

1.1.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo a proposta de uma arquitetura¹⁰ baseada no modelo de arquitetura de referência para a Indústria 4.0 (RAMI 4.0), para a descoberta e seleção de equipamentos para processar operações conforme os requisitos do produto. Nesta proposta, as máquinas são organizadas em uma rede hierárquica de equipamentos (RHE). A arquitetura envolve um conjunto de componentes e serviços

¹⁰ O termo arquitetura utilizado no escopo dessa pesquisa está relacionado à arquitetura de *software*. Usar um modelo de arquitetura de referência é uma forma eficaz para estar em consonância com a proposta desse trabalho (vide Apêndice C).

para permitir a troca de informações entre equipamentos e produtos, de modo que um equipamento possa identificar a sua capacidade para processar uma operação requisitada pelo produto ou se há necessidade de encaminhar o produto para outro equipamento da rede. Assume-se que por meio da RHE, o equipamento tem informações de si próprio e também de outros equipamentos. Na RHE também se armazenam dados de equipamentos de parceiros que vão além dos limites da fábrica. Adicionalmente, esse trabalho introduz um procedimento para a descoberta de equipamentos similar ao DNS¹¹ (*Domain Name System* - sistema de nomes de domínios) da *Internet*. A diferença entre eles é que o DNS é utilizado para resolver nomes de domínios para endereços de rede, enquanto que a RHE oferece subsídios para resolver qual equipamento deve processar uma operação requisitada.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, este trabalho envolve os seguintes objetivos específicos:

- Realizar estudos investigativos sobre a I4.0 de modo a conhecer as principais tecnologias que dão suporte a ela, principalmente, o CPS e a IoT;
- Caracterizar os meios para a comunicação entre entidade física e virtual com base nos modelos de arquiteturas de referência como o RAMI 4.0, assim como identificar as principais camadas e componentes que possibilitem a interação que envolve os níveis físico, integração, comunicação, e digital;
 - Projetar uma arquitetura e definir os componentes necessários para a descoberta e seleção de equipamentos, tais como robôs, tornos, fresas, entre outros, capazes de processar operações requisitadas pelos produtos;
- Elaborar a modelagem conceitual e funcional da arquitetura por meio da técnica formal PFS/RdP para verificar e validar os componentes e as interações entre eles;
- Identificar as tecnologias chaves que viabilizam a aplicação da arquitetura;
- Demonstrar a aplicação da arquitetura por meio de estudos de casos que envolvam a interação entre produtos e equipamentos de processos produtivos.

¹¹ Com o DNS os equipamentos pertencentes a um domínio de rede de computadores são organizados hierarquicamente, onde cada segmento da hierarquia é um identificador que possibilita a localização (resolução de endereço) de um equipamento particular na rede de comunicação por meio de um algoritmo de busca (COMER, 2001; COULOURIS; DOLLIMORE; KINDBERG, 2007).

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Além desse capítulo introdutório o trabalho apresenta mais 6 (seis) capítulos e 4 apêndices.

No capítulo 2 é apresentado um panorama sobre a Indústria 4.0 e as principais tecnologias que dão suporte à sua implementação, tais como o CPS, a IoT, a SOA e a OPC UA (*OPC Unified Architecture*). Também é apresentado um estudo sobre modelagem de sistemas a eventos discretos (SED) com Rede de Petri e PFS (*Production Flow Schema*).

No capítulo 3 é realizada uma revisão em torno de modelos de arquiteturas de referência para IoT, CPS e I4.0. O capítulo é finalizado com um levantamento de trabalhos correlatos a este trabalho.

No capítulo 4 é detalhada a proposta da arquitetura para a descoberta e seleção de equipamentos para processar operações requisitadas pelos produtos, contemplando ainda a descrição sobre suas camadas e componentes com as respectivas interações entre eles. Neste capítulo é mostrado também o fluxo das operações entre os componentes da arquitetura.

No capítulo 5 é realizada a modelagem conceitual e funcional da arquitetura com o propósito de verificar e validar os componentes e sua interatividade. Apresenta-se inicialmente a modelagem conceitual das interações dos componentes. A seguir, deriva-se a modelagem funcional que é elaborada por meio de RdP para a verificação e validação dos comportamentos da arquitetura.

No capítulo 6 é apresentado um exemplo de aplicação com o objetivo de mostrar a implementação da arquitetura conforme os componentes identificados e caracterizados na modelagem do sistema.

Por fim, no capítulo 7 são descritas as considerações finais do trabalho e apontadas as direções para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

Para complementar o trabalho, no Apêndice A é apresentada a metodologia aplicada no desenvolvimento desta pesquisa. O Apêndice B contempla os trabalhos publicados decorrentes dela. No Apêndice C é explanado o conceito de arquitetura de sistemas e também é apresentada uma abordagem sobre modelo de arquitetura de referência. No Apêndice D é apresentada uma proposta de arquitetura baseada em modelos de referências para IoT e em especial o IoT-ARM, que também serviu de apoio para o desenvolvimento deste projeto de doutorado. Com o lançamento do RAMI 4.0 em 2015, a arquitetura proposta neste trabalho foi reestruturada e novos

componentes foram definidos para estar em conformidade com este recente modelo de referência para a Indústria 4.0.

2 INDÚSTRIA 4.0: TECNOLOGIAS E RECURSOS CONSIDERADOS PARA SUA IMPLEMENTAÇÃO

Neste capítulo é relatado um panorama da Indústria 4.0 (I4.0) como sinônimo da fábrica inteligente que é influenciada diretamente pelo CPS, a IoT e a integração de sistemas de controle por meio da tecnologia OPC UA (*OPC Unified Architecture*) (Figura 3). Na I4.0 são utilizadas as TIC (Tecnologias de Informação e Comunicação), identificação baseada em tecnologias tais como RFID (*Radio Frequency Identification*), NFC (*Near Field Communication*), códigos QR (*QR-Code – Quick Response Code*) e códigos de barra (*barcode*), que propiciam o monitoramento e rastreamento de objetos físicos, tais como os produtos de uma linha de produção. Também é considerada a computação em nuvem¹² que tem participação no escopo da I4.0 no que diz respeito à hospedagem e compartilhamento de serviços e dados. A I4.0 envolve a digitalização de serviços, e nesse sentido é realizada uma explanação sobre SOA (*Service Oriented Architecture*) e a sua implementação por meio de WS (*Web Services*). Logo a seguir são apresentadas as arquiteturas de referências com ênfase na implementação da I4.0, principalmente no que se refere à organização e estrutura de componentes que possibilitam a comunicação entre recursos de chão de fábrica. Por fim, é apresentada uma abordagem sobre a modelagem de sistemas a eventos discretos por meio da técnica *Production Flow Schema* (PFS) / Rede de Petri (RdP), com vistas à verificação e validação de arquitetura de sistemas.

2.1 SERVIÇOS

Nesta subseção é realizada uma explanação a respeito de serviços computacionais (digitalização dos serviços físicos) devido a sua relevância em torno das expectativas da I4.0. Neste contexto, os serviços físicos são digitalizados¹³ passando a ser partes integrantes de um mundo virtual. Com isso os serviços virtuais

¹² Embora a computação em nuvem tenha sua importância no contexto da I4.0 ela não é imprescindível para a proposta da arquitetura deste trabalho, mas vale destacar que a mesma pode ser aplicada nesses ambientes também.

¹³ No contexto deste trabalho entende-se por digitalização o mapeamento dos ativos técnicos para a sua forma digital para serem utilizados por suas representações virtuais. Assim sendo, a digitalização é processo de transformar a informação em um formato que pode ser compreendido por um sistema computacional. Por outro lado, a virtualização é a capacidade de integrar os mundos físico e real de forma que tudo aquilo que acontece no mundo físico possa ser monitorado no virtual e vice-versa (MACDOUGALL, 2014; GREGOR; HERCKO; GRZNAR, 2015).

e físicos interagem de modo que os acontecimentos do mundo real causem efeitos na sua representação virtual e vice-versa.

Figura 3 – Principais conceitos e tecnologias envolvidos nesta pesquisa com suas relações.

Fonte: O autor.

De acordo com Dustdar e Papazoglou (2008), no contexto computacional os serviços são operações que variam de simples respostas à requisições de processos até a execução de procedimentos de negócios complexos, os quais requerem uma comunicação entre provedores e consumidores de serviços virtuais. Os serviços virtuais são processos independentes que são descritos, disponibilizados, localizados e invocados por meio de redes de comunicação. Este conceito está associado à computação orientada a serviços (SOC – *Service-Oriented Computing*) que diz respeito a um tipo de plataforma de computação distribuída (ERL, 2009). Segundo Wang; Shen e Hao (2006), o paradigma da computação orientada a serviço está transformando a gestão do fluxo tradicional de trabalho de um sistema centralizado e fechado para um sistema com processos de negócios descentralizados e abertos.

2.1.1 Arquitetura Orientada a Serviços e Serviços Web

Para Erl (2009), a arquitetura orientada a serviços, também conhecida pela sigla SOA (*Service Oriented Architecture*) visa aprimorar a eficiência, a agilidade e a produtividade de uma empresa com o foco nas atividades vistas todas como serviços. Segundo Robert Brewin apud Kumar; Narayan e Ng (2012), o objetivo do SOA é oferecer uma arquitetura para suportar a proliferação e a adoção de serviços digitais reutilizáveis. Ainda de acordo com Kumar; Narayan e Ng (2012), a SOA é definida

como a arquitetura que permite interligar recursos sob demanda. Neste contexto, as informações e os recursos ficam disponíveis para todas as partes interessadas na forma de serviços e dados que são acessados de um modo padrão. Segundo Sheng et al., (2014), a SOA é uma arquitetura para organizar infraestruturas e aplicações de *software* em um conjunto de serviços passíveis de interação. A SOA estabelece uma arquitetura para permitir que serviços possam ser publicados, descobertos e consumidos por aplicações ou outros serviços (MELO, 2011; SOUIT, 2013; SOUIT et al., 2013; SHENG et al., 2014).

A SOA representa um paradigma que envolve a organização e utilização de serviços distribuídos na forma de *software* que estão sob controle de diferentes proprietários. A ideia é assegurar um ambiente uniforme para oferecer, descobrir, interagir e utilizar os serviços (*software* computacionais) com o intuito de produzir efeitos desejados (MELO, 2011). A SOA é reconhecida como uma abordagem para apoiar a integração e a colaboração de recursos distribuídos. Ela adota uma arquitetura distribuída com base no conceito de serviço. Nesta arquitetura, os serviços são invocados de forma independente por qualquer solicitante de serviços (externos ou internos) para processar funções simples ou trabalhar em conjunto por meio de implementações coordenadas com outras entidades para desenvolver novas funcionalidades para os processos existentes (KUK et al., 2008).

Na manufatura, a SOA é adequada para tratar dos seus recursos, principalmente pela natureza heterogênea desses ambientes (MELO et al., 2010). De fato, ela conduz à ideia de que cada *hardware* programável é considerado como um potencial dispositivo cujas funcionalidades são publicadas na forma de serviços e que permite a sua programação e/ou configuração por meio de aplicativos. Segundo Veiga; Pires e Nilsson (2009) as funcionalidades dos dispositivos são operadas por diferentes módulos de sistemas independentes da heterogeneidade do *hardware/software*, permitindo a interoperabilidade dos sistemas.

Para a implementação da SOA a tecnologia mais utilizada é a de *Web Services* (WS) (SOUIT, 2013; SHENG et al., 2014), que é uma solução que agrupa um conjunto básico de padrões que especificam a definição, troca e transporte das mensagens e a coordenação de serviços (FATTORI et al., 2011a; MELO, 2011). Um WS é essencialmente uma abstração semanticamente definida de um conjunto de atividades físicas ou computacionais envolvendo recursos, cuja intenção é atender necessidades de consumidores ou requisitos de negócios (SHENG et al., 2014; XU;

HE; LI, 2014). No contexto da I4.0, a tecnologia recomendada para a implementação e integração de serviços da SOA também é a de *Web Services* (WS), principalmente pelo fato desta permitir a implementação de serviços independente de tecnologia, garantindo a interoperabilidade dos sistemas. Kuk et al. (2008) e Sheng et al. (2014), por exemplo, afirmam que SOA é implementada por meio de um conjunto de padrões flexíveis e interoperáveis para sistemas distribuídos possibilitando a composição de serviços. Já existem trabalhos que usam o WS para a composição de serviços e colaboração entre SP (Sistemas Produtivos) distribuídos geograficamente, os chamados SPDs (Sistemas Produtivos Dispersos), e para Kagermann e Riemensperger (2014) esta é uma técnica fundamental para viabilizar a I4.0.

Os WSs oferecem um padrão de interoperabilidade entre aplicações de *software* diferentes, e que são executados em uma variedade de plataformas. Eles são caracterizados por sua grande interoperabilidade e extensibilidade devido à utilização da XML (*eXtensible Markup Language*) e, logo, eles são combinados de forma flexível a fim de alcançar operações relativamente complexas (W3C¹⁴).

Os WSs são desenvolvidos de duas formas: WS baseado em SOAP (*Simple Object Access Protocol*) e WS RESTful (REST – *Representational State Transfer*). O primeiro depende de três elementos padronizados, o WSDL, o SOAP e o UDDI (*Universal Description, Discovery, and Integration*). WSs baseados em SOAP são independentes de protocolo e mantém o estado operacional (*stateful*), o que demanda mais de recursos computacionais, principalmente ao manipular mensagens SOAP. Normalmente WSs baseados em SOAP são usados para integrar aplicações corporativas complexas. WSs baseados em RESTful, de acordo com Meissner et al. (2012), são serviços de baixo nível para acessar dispositivos e recursos, utilizando o REST. Esta forma de implementação de WS foi introduzida para a construção de sistemas hipermídia distribuídos em larga-escala. Os WSs em REST interagem por meio de uma interface uniforme a qual contempla um conjunto fixo de operações da *Web* e do protocolo HTTP (*HyperText Transfer Protocol*) e são identificados por URI (*Universal Resource Identifier*), que oferece um espaço de endereçamento global para descoberta de serviços e recursos. Os serviços baseados em REST interagem via troca de mensagens de solicitação e resposta, cada qual incluindo informações

¹⁴ W3C – *World Wide Web Consortium* (<http://www.w3.org/>). É uma entidade responsável pela padronização da rede mundial de computadores, a *Internet*. Este órgão desenvolve as especificações técnicas e recomendações para garantir as qualidades técnicas dos serviços e tecnologias desenvolvidos para a *Web* (“W3C Brasil - World Wide Web Consortium Escritório Brasil”, 2017).

suficientes que determinam como processar a mensagem. WS REST tendem a ser mais leves do ponto de vista de carga computacional por não manter o estado operacional (*stateless*) das transações (SHENG et al., 2014).

Os serviços podem assim ser implementados em diferentes computadores e serem distribuídos em uma rede de comunicação local e/ou em redes distribuídas e heterogêneas (DUSTDAR; PAPAOGLOU, 2008), ou ainda em redes colaborativas dispostas em uma infraestrutura baseada na computação em nuvem (PISCHING et al., 2015a). Da mesma forma, os serviços são classificados como serviços *Web* atômicos e serviços *Web* compostos. O primeiro se refere a um serviço elementar e não depende de outros serviços *Web*, mas atende a todos os requisitos de um serviço qualquer, acatando as requisições do consumidor. Já o segundo é uma estrutura composta por serviços atômicos e outros serviços compostos que, juntos, implementam um conjunto de operações para atender a uma demanda específica.

2.1.2 Composição de serviços

Unir componentes e combinar funcionalidades de WSs é uma operação chamada de composição de serviços. Uma composição de serviços é realizada por meio da combinação de serviços elementares ou destes com serviços compostos (DUSTDAR; PAPAOGLOU, 2008).

A composição de serviços, publicados em servidores distribuídos numa rede de comunicação, viabiliza o desenvolvimento e a criação de serviços colaborativos, formados por uma empresa e grupos de parceiros. De acordo com Sheng et al. (2014), a composição de serviços *Web* permite que organizações formem alianças para terceirizar funcionalidades, assim como, forneçam meios para criar um ponto comum de venda/atendimento aos clientes e, ainda, proporcionem o reuso de serviços, o que possibilita a redução de custos e a diminuição de riscos no que diz respeito à criação de novos negócios e produtos. Tratando-se da união de serviços, muitas vezes disponibilizados por terceiros, torna-se necessário o uso de mecanismos denominados orquestração¹⁵ e coreografia¹⁶ que determinem qual serviço pode ser utilizado mediante uma série de fatores, tais como, dinâmica dos negócios,

¹⁵ Orquestração – É comumente usada para indicar o processo de negócio ou fluxo de trabalho das corporações. É utilizado para a composição de processos de negócio por meio de serviços *Web* onde um processo principal controla e coordena os demais processos (KUMAR; NARAYAN; NG, 2012).

¹⁶ Coreografia – É a composição de processos de negócio onde não é necessário um processo principal para controlar ou coordenar os demais processos. Neste caso cada processo envolvido conhece a qual composição ele faz parte (KUMAR; NARAYAN; NG, 2012).

localização, disponibilidade, confiabilidade e segurança (DUSTDAR; PAPAZOGLU, 2008; FATTORI et al., 2011a).

O papel da orquestração de serviço é coordenar as interações entre diferentes serviços, por meio de um processo de negócio único. Por isso a orquestração de serviço sempre representa o controle sob a perspectiva de uma das partes envolvidas. De acordo com Sheng et al. (2014), a orquestração é considerada como uma construção entre um processo automatizado e um serviço particular, que define os passos de execução do processo. A orquestração inclui o gerenciamento de transações entre serviços individuais, incluindo a manipulação de casos de exceção e de erros, assim como a descrição de todo o processo. A orquestração de serviços *Web* se dá por meio do padrão WS-BPEL (*Web Services – Business Process Execution Language*). De acordo com Souit (2013) a orquestração por meio da SOA garante a flexibilidade estrutural considerando as características heterogêneas dos componentes de um sistema produtivo que interagem num sistema disperso.

A coreografia de serviço é mais colaborativa e permite que cada parte envolvida possa descrever seus serviços na interação (FATTORI et al., 2011a). Segundo Sheng et al. (2014), a coreografia representa uma descrição global do comportamento observável de cada um dos serviços participantes da interação, o que é definido pela troca pública de mensagens, regras de interação e acordos entre dois ou mais processos de negócios. Para Souit (2013) a coreografia é a interação entre componentes distribuídos sem a existência de uma entidade controlando a lógica de colaboração, como acontece no mecanismo de orquestração. A coreografia é normalmente associada com interações que ocorrem entre múltiplos serviços *Web*. Para Fattori et al. (2011b), apenas as trocas de mensagens públicas são consideradas relevantes e cada serviço tem domínio apenas sobre suas próprias interações e comportamentos. A coreografia é suportada pelo padrão WS-CDL (*Web Services Choreography Description Language*) (SHENG et al., 2014).

2.1.3 Procura e Resolução de Serviços

Na sua essência a SOA é uma arquitetura que permite que serviços sejam publicados, procurados/descobertos e consumidos por aplicações ou, até mesmo, por outros serviços. Nesta subseção aborda-se a localização e resolução de serviços.

A proposta do W3C é que um WS seja um *software* identificado por uma URI, cujas interfaces e vinculações públicas sejam definidas e descritas usando a XML.

Estas definições são descobertas por outros sistemas que interagem com o WS de uma forma prescrita pela definição usando mensagens XML transmitidas por meio de protocolos da *Internet*. Os serviços para serem executados devem oferecer funcionalidades que permitam que seus consumidores possam encontrá-los e fazer interações. Essas funcionalidades resumem-se à descoberta, procura e resolução (DE LAS HERAS et al., 2011). A descoberta tem por função encontrar serviços sem qualquer conhecimento prévio sobre a identidade do serviço. A procura é uma funcionalidade que permite ao consumidor acessar a descrição do serviço tendo conhecimento prévio sobre o identificador do serviço. A função de resolução traduz as identidades dos serviços em termos de endereços na rede de comunicação ou localizadores por meio dos quais os consumidores possam acessar os serviços (SHENG et al., 2014).

Os conceitos envolvidos na descoberta e também na descrição de serviços, tornam-se as bases para a procura de serviços e suas associações no IoT-ARM, o que é tratado como Infraestrutura de Resolução na IoT (MEISSNER et al., 2012). Logo, uma infraestrutura de resolução de serviços é utilizada para encontrar serviços e suas associações com uma determinada entidade de acordo com atributos dados como entrada e, assim, tornar possível a busca e composição de serviços e “coisas” da IoT. Para De Las Heras et al. (2011), para que isso seja possível, uma infraestrutura adequada precisa estar em um local que possibilite a resolução, a procura e a descoberta de serviços IoT e o nível de abstração adequado deve ser assumido e fornecido aos programadores de aplicativos. Em Yan et al. (2013), é definido um serviço de resolução de nome na IoT que visa a identificação de objetos para usuários finais ou agentes de *software* para obter as informações dos recursos relacionados com os identificadores de dados, respeitando os direitos de acesso.

Para resolver as identidades para encontrar o serviço a ser executado em meio a recursos e entidades físicas heterogêneas, são necessários mecanismos para encontrar o serviço desejado. De acordo com Yan et al. (2013) esta tarefa é classificada de duas formas:

- a) Serviços concentrados e serviços distribuídos. Ambos são classificados de acordo com a forma de armazenar registros de resolução. Nos serviços concentrados, os registros de resolução são armazenados em um repositório único e fechado. Em serviços distribuídos os registros de resolução são armazenados em repositórios abertos consistindo de múltiplos nós autônomos.

- b) Serviços hierárquicos e serviços planos (*flat services*). O primeiro refere-se a uma estrutura baseada em árvore, similar ao DNS. Um serviço baseado em DNS para fins de identificação de objetos é denominado ONS (*Object Name Service*), cujo propósito é resolver códigos EPC (*Electronic Product Code*¹⁷). O segundo refere-se a uma comunicação ponto-a-ponto (*peer-to-peer*), similar ao DHT (*Distributed Hash Table*¹⁸). A ONS possui uma organização hierárquica e faz a localização de “coisas” e serviços, traduzindo para o endereço onde o recurso se encontra, permitindo assim o seu acesso virtual (GAMA; TOUSEAU; DONSEZ, 2012; BAUER et al., 2013b; BOUSSARD et al., 2013; HO et al., 2013).

2.2 INTERNET DAS COISAS (IoT)

A “Internet das Coisas” (*Internet of Things*¹⁹ - IoT), cuja expressão foi criada em 1999 por Kevin Ashton, vem se tornando uma tendência em vários setores, entre eles o industrial (ASHTON, 2009; KRAMP; VAN KRANENBURG; LANGE, 2013). Segundo Xu; He e Li (2014) o termo IoT foi inicialmente proposto para se referir a identificadores únicos de “coisas” interoperáveis por meio da tecnologia RFID. A IoT é uma infraestrutura de rede de comunicação global e dinâmica baseada em protocolos de comunicação interoperáveis onde “coisas” físicas e virtuais possuem identificadores, atributos físicos e identidade virtual, fazendo uso de interfaces inteligentes para se integrar às redes de comunicação (VAN KRANENBURG; DODSON, 2008). A IoT refere-se a vários tipos de dispositivos de comunicação que permitem a troca de informação e operações entre equipamentos, produtos e objetos pessoais, também chamados de “coisas” (GUBBI et al., 2013; KASTNER et al., 2014). Assim sendo, a IoT oferece meios de comunicação entre sensores, atuadores e produtos inteligentes para prover a troca de dados entre “coisas”, tais como produtos e máquinas (LASI et al., 2014), contribuindo para o desenvolvimento de sistemas mais autônomos para o chão de fábrica (MCFARLANE et al., 2013; UNGUREAN; GAITAN; GAITAN, 2014).

Segundo Bassi et al. (2013), o advento IoT é dividido em três momentos. O primeiro está relacionado às tecnologias de código de barras e RFID, que ajudam

¹⁷ EPC – *Electronic Product Code* – é um identificador universal que garante uma identidade única para um objeto físico específico. Esta identidade é projetada para ser única em meio a todos os objetos físicos e todas as categorias de objetos físicos do mundo. Em muitos casos os códigos EPC são codificados em *tags* RFID que servem para rastrear todos os tipos de objetos. (<http://www.epc-rfid.info/>) (<http://www.gs1.org/epcglobal>)

¹⁸ DHT – *Distributed Hash Table* - <http://www.ime.usp.br/~vmoreira/DHT.html>

¹⁹ *Internet of Things* (IoT) é a denominação conhecida mundialmente para *Internet das Coisas*. Portanto, a sigla IoT é adotada no decorrer deste texto.

automatizar o rastreamento, o inventário e a identificação de “coisas”. O segundo momento, o qual está sendo vivenciado, é caracterizado pela conexão de sensores, dispositivos, dados e aplicativos. O terceiro momento, o qual se chama de “IoT cognitiva”, tende a facilitar o reaproveitamento de informações de “coisas” e dados, potencializando a interconectividade e as soluções interoperáveis com a distribuição de informação enriquecida em semântica.

De acordo com Aström e Kumar (2014), a IoT está centrada na conexão de um vasto número de “coisas” físicas. Segundo a pesquisa publicada em Building [...] (2014) a IoT descreve um sistema onde “coisas” físicas, com sensores ligados ou embarcados a elas, estão conectadas à *Internet* via redes de comunicação com ou sem fio. Ainda, por meio da IoT, muitas “coisas” são conectadas, envolvendo desde equipamentos industriais até objetos do cotidiano, como por exemplo dispositivos médicos, automóveis e residências. O aumento de “coisas” interconectados desperta cada vez mais a atenção de profissionais das áreas de TIC e Engenharia, dado os novos desafios e obrigações a serem atendidos, dentre os quais se destaca a oferta de serviços digitalizados que são compartilhados e integrados a elas.

O crescimento e a aquisição de dispositivos com suporte a IoT têm sido estimulados pela disponibilidade de processadores mais rápidos e também a um menor custo, por tecnologias de baterias melhoradas e ainda pela expansão da infraestrutura de comunicação sem fio. A ubiquidade de sensores compactos e de baixo custo que oferecem a conexão de dispositivos embarcados em redes de comunicação colaboram para que dispositivos possam se tornar inteligentes, autônomos e portáteis (LESSARD, 2014).

No setor industrial a rápida proliferação da IoT representa uma transformação nos processos industriais e na infraestrutura, de maneira que os fabricantes de equipamentos e máquinas de automação têm investido fortemente em tecnologias computacionais embarcadas que suportem a IoT e possam estar cada vez mais preparadas para este advento, o que é chamado também de IIoT (*Industrial Internet of Things*) (HENG, 2014; XU; HE; LI, 2014). Nesse contexto a IoT está centrada em um número infinito de “coisas” inteligentes que se comunicam entre si por meio de infraestruturas de redes de comunicação existentes (HANNAH, 2014).

De acordo com Xu; He e Li (2014), uma tecnologia fundamental para a IoT é a RFID que por meio de *microchips* transmitem dados de identificação para leitores usando comunicação sem fio. Além da RFID a IoT envolve outras tecnologias, tais

como NFC (*Near Field Communication*), sensores, atuadores, dispositivos equipados com GPS (*Global Positioning System*) e dispositivos móveis (GUBBI et al., 2013). Todas essas tecnologias, para suportar a IoT, devem oferecer no mínimo um meio de comunicação passiva e um identificador único para permitir a troca de informação entre diferentes tipos de dispositivos conectados à *Internet*.

A IoT é formada por dispositivos e sistemas heterogêneos e objetiva conectar diferentes “coisas” por meio das redes de comunicação, exigindo assim tecnologias para integrá-los e assim torná-los compatíveis. De acordo com Xu; He e Li (2014) e Souit et al. (2013), a tecnologia para integrar sistemas ou dispositivos heterogêneos é a SOA (*Service Oriented Architecture*).

2.3 SISTEMAS CIBER-FÍSICOS

A denominação “sistemas ciber-físicos”, do inglês *Cyber-Physical Systems* (CPS), surgiu em 2006 por um grupo de pesquisadores nos Estados Unidos, cujo propósito foi descrever o acoplamento cada vez mais forte entre dispositivos de controle com a computação e redes de comunicação (ASTRÖM; KUMAR, 2014), isto é, um CPS envolve sensoriamento e atuação por meio de dispositivos físicos heterogêneos e componentes computacionais interligados e interagindo em redes de comunicação. Segundo Kang et al. (2016), os CPSs são sistemas com capacidade computacional que estão conectados com entidades do mundo físico e os processos que os cercam, ao mesmo tempo que fornecem e usam serviços de acesso e processamento de dados disponíveis na Internet.

No ambiente de manufatura, os CPSs, também chamados de CPPS (*Cyber-Physical Production Systems*), pelo fato de estarem centrados nesta área, mas que não diferem em termos de conceitos gerais (MONOSTORI, 2014), compreendem maquinários, sistemas de estoque, sistemas de distribuição, sistemas produtivos e outros, com a capacidade de executar operações autônomas, tais como: trocar informações, disparar eventos e controlar uns aos outros de forma independente (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013). Isso é possível por meio de microcomputadores cada vez mais poderosos e autônomos na forma de sistemas embarcados que são interligados uns aos outros e com a *Internet*, resultando na convergência dos mundos físico e virtual, principalmente pelo uso da IoT. Segundo Wang; Törngren e Onori (2015), a IoT é vista como uma tecnologia essencial utilizada

para a criação de uma classe especial de CPS, isto é, sistemas cibernéticos com a capacidade de comunicação via *Internet*.

A implantação de CPSs nos sistemas produtivos geram fábricas inteligentes, cujos produtos, recursos e processos são todos caracterizados como entidades que se comunicam para resolver processos de forma mais autônoma e dinâmica frente aos requisitos de produção. Neste cenário, a comunicação entre os recursos, tais como peças e máquinas, visa assegurar a manufatura de produtos personalizados e sob demanda para atender a necessidades individuais de consumidores.

Os componentes elementares de um CPS são mostrados na Figura 4. Os sistemas físicos e mecânicos devem possuir interfaces que permitam a interação entre usuários e outros sistemas (autônomos), sejam eles locais ou via rede de comunicação. Por meio destas interfaces é realizada a interação com os sistemas embarcados presentes nos equipamentos por meio de sistemas de controle que interagem com seus sensores e atuadores (BROY, 2010; BRETTEL et al., 2014; MONOSTORI, 2014). Os sistemas embarcados e conectados em rede de comunicação, monitoram e controlam os processos físicos com operações de pedidos e respostas, onde os processos físicos afetam o virtual e vice-versa.

Por meio dos CPSs as fábricas são acessíveis por ambientes virtuais tridimensionais (3D) onde é possível que operários sejam treinados para usar com segurança os equipamentos envolvidos em uma linha de produção, antes mesmo que ela seja fisicamente instalada. Da mesma forma, um novo produto é experimentado virtualmente e testado pelos engenheiros, bem como pelos consumidores do produto, de tal maneira a identificar a satisfação no que diz respeito à sua usabilidade e qualidade (KOPÁCSI; KOVÁCS; NACSA, 2013), permitindo que o consumidor seja participativo na criação de novos produtos. Por meio dos ambientes e modelos 3D, a prototipagem de produtos pode ser otimizada, ao mesmo tempo que se evita a produção de produtos que não atendam as expectativas dos consumidores (BRETTEL et al., 2014). Além disso, defeitos e problemas do produto final são visualizados e observados na fase de experimentação virtual, evitando que prejuízos maiores ocorram após a fabricação efetiva do produto.

Figura 4 – Estrutura e componentes básicos de um CPS.

Fonte: Adaptado de Broy (2010).

2.3.1 Tecnologia OPC UA

A tecnologia OPC, inicialmente uma sigla para OLE (*Object Linking and Embedding*) for Process Control, foi concebida como um padrão de interoperabilidade para a troca de dados de forma confiável e segura no escopo da automação industrial. O propósito da tecnologia foi de assegurar a troca de informações entre dispositivos de múltiplos fabricantes ("What is OPC?", 2017).

Inicialmente, quando uma norma foi liberada pela primeira vez em 1996, a tecnologia era restrita ao sistema operacional Windows da Microsoft. Nesta primeira liberação a OPC dava suporte para protocolos específicos de CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), tais como o Modbus e Profibus, por meio de uma interface padrão para permitir a interação de sistemas de interface homem-máquina (HMI – *Human-Machine Interface*), ou também *software* supervisórios SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) com dispositivos de chão de fábrica.

A tecnologia evoluiu e passou a ser conhecida como OPC (*Open Platform Communication*) Classic. Ela se tornou um padrão mundialmente conhecido e adotado por vários setores, tais como manufatura, automação de edifícios, petróleo e gás, energia renovável e outros ("What is OPC?", 2017).

Em 2008 foi publicada a tecnologia OPC UA (*OPC Unified Architecture*). Ela é uma arquitetura orientada a serviços independente de plataforma, isto é, ela passa a ser compatível com outros sistemas operacionais e diferentes tipos de *hardware*, independente de fabricante (PRAMUDIANTO et al., 2013). A OPC UA, atualmente especificada pela norma IEC 62541 (IEC-62541-100:2015, 2015), oferece meios para integrar sistemas de plataformas diferentes, além de ser compatível com a OPC *Classic*. De acordo com Pérez et al. (2015), a integração dos dispositivos físicos com os virtuais no contexto dos CPSs são realizados por meio da OPC UA.

2.4 INDÚSTRIA 4.0

O termo Indústria 4.0 (I4.0), que se refere à quarta revolução industrial, foi apresentado pela primeira vez na feira de Hannover em 2011 e no mês de abril de 2013²⁰ foi iniciado o projeto “Plataforma Indústria 4.0” (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013). Desde então, a Indústria 4.0 vem sendo tema de pesquisa e desenvolvimento, o qual é liderado e financiado pelo governo da Alemanha, mas também apoiado por órgãos de outros países (LASI et al., 2014; HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016), cujo propósito é a fusão do mundo real com o mundo virtual (GILL, 2013). A I4.0 apresenta um novo cenário da produção industrial que, segundo Bangemann et al. (2016), é caracterizado por três aspectos principais:

- Um novo meio de organizar e controlar toda cadeia de valores com o ciclo de vida de produtos.
- A disponibilidade de informações relevantes em tempo real pela interconexão de todas as instâncias envolvidas nos processos de criação de valores.
- A criação de redes de valores entre empresas auto-organizáveis, dinâmicas e em tempo real por meio da interconectividade de humanos, “coisas” e sistemas de acordo com suas habilidades/capacidades.

Diante da importância e do impacto que a I4.0 vem apresentando globalmente, ela foi tema do Fórum Econômico Mundial em janeiro de 2016 em Davos na Suíça, que reúne anualmente lideranças de todo o mundo para discutir as questões urgentes que estão em destaque no mundo. O tema foi intitulado “*Mastering the Fourth*

²⁰ O projeto da Indústria 4.0 foi financiado pelo governo da Alemanha e dirigido pelas seguintes associações profissionais: German Engineering Federation (VDMA); German Electrical and Electronic Manufacturer's (ZVEI); e, Federal Association for Information Technology, Telecommunications and New Media (BITKOM).

*Industrial Revolution*²¹, cujo propósito foi apresentar o cenário da I4.0, as oportunidades geradas por ela e também as preocupações em torno da formação de profissionais para esse novo momento da indústria (CHANTANAYINGYONG, 2016; SCHWAB, 2016).

A I4.0, é vista como uma entidade que usa recursos baseados na IoT, nos CPSs e em serviços digitais, amparada por uma infraestrutura baseada na computação em nuvem, para a comunicação entre os recursos presentes no que é chamado de fábrica inteligente, de modo a atender as demandas e exigências dos consumidores de forma individual e personalizada (Figura 5).

Segundo MacDougall (2014) a I4.0 visa conectar as tecnologias embarcadas do sistema produtivo e os processos de produção baseada em uma nova era tecnológica. Ainda, para MacDougall (2014), a I4.0 refere-se à evolução tecnológica dos sistemas embarcados para os CPSs e segue em direção à *Internet* das Coisas, Dados e Serviços (IoTDS – *Internet of Things, Data and Services*). Para Gorecky et al. (2014), na I4.0 todos os recursos da fábrica são equipados com tecnologias que os capacitam a comunicar e processar informação. De acordo com Kagermann; Wahlster e Helbig (2013) a I4.0 é um novo tipo de industrialização, e é assim denominada por se tratar da quarta revolução industrial²², ou ainda, a era da fábrica inteligente (*smart factory*), por meio do emprego das TIC. Com o emprego dos CPSs e da IoT no ambiente de fabricação, as empresas estabelecem redes globais – como se fossem redes sociais, por meio das quais elas usufruem de maior colaboração por intermédio da integração de maquinários, sistemas de estoque e instalações produtivas, assim como pelo compartilhamento dos aspectos intelectuais envolvidos no setor industrial, tais como, conhecimentos, competências e habilidades (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013). Essa abordagem contribui para a melhoria dos processos industriais como engenharia, manufatura, controle da cadeia de suprimentos, uso adequado de materiais, e o gerenciamento do ciclo de vida de produtos.

Pela IoT todas as “coisas”, tais como equipamentos, ferramentas, produtos, etc., envolvidos nos processos produtivos estão aptos a realizar comunicação e troca de informações entre eles, seja de forma ativa ou passiva. De acordo com Lee; Kao e

²¹ World Economic Forum – Annual Meeting – 20-23 January 2016. Davos-Klosters, Switzerland. <http://www.weforum.org/events/world-economic-forum-annual-meeting-2016>

²² A 4ª revolução industrial tem a sua origem na Alemanha, portanto a denominação original é “*Industrie 4.0*”, e sua respectiva tradução para a língua inglesa é “*Industry 4.0*”. Neste trabalho sé adotada a denominação Indústria 4.0 ou a sigla I4.0.

Yang (2014), na I4.0 as máquinas são conectadas tal como uma comunidade colaborativa, o que requer a utilização de ferramentas computacionais que possam sistematicamente transformar dados em informações.

Figura 5 – Indústria 4.0 baseada na IoT, nos CPSs e computação em nuvem para atender exigências personalizadas do consumidor.

Fonte: O autor.

A essência da IoT é o princípio básico da I4.0 para proporcionar a manufatura otimizada e cada vez mais autônoma de produtos por meio da comunicação entre máquinas e produtos. Desta forma, uma empresa cria redes colaborativas de toda a cadeia de valor que se comunicam e controlam umas às outras com a redução significativa da intervenção de operadores (BUILDING ..., 2014). Neste cenário a principal interação entre máquinas e produtos envolve a identificação das operações a serem executados durante o processo de manufatura.

2.4.1 Cenário global

A Figura 6 apresenta uma visão global da I4.0 e principais participantes envolvidos neste modelo de negócio. Eles estão conectados e amparados por serviços de TIC, sob a perspectiva de um alcance mundial, por meio da computação em nuvem e da IoT e serviços para possibilitar a integração de sistemas heterogêneos e computação ubíqua, favorecendo a realização de negócios globalizados.

Neste cenário as empresas, indústrias, organizações e todas as partes interessadas em negócios globais devem digitalizar, publicar e disponibilizar os seus serviços em um sistema de comunicação em rede, como por exemplo os sistemas baseados na computação em nuvem (Figura 7).

Figura 6 – A Indústria 4.0 e seus principais participantes em ambiente colaborativo amparado pelas TIC.

Fonte: Adaptado de Pisching et al. (2015b, 2016a).

Os serviços tornam-se componentes que representam sistemas, entre eles os sistemas produtivos dispersos que são de alguma forma associados para juntos resolverem uma demanda específica. A união de serviços, também chamada de composição de serviços, permite a criação de soluções temporárias e também o estabelecimento de empresas virtuais (PESSOA et al., 2012), possibilitando a formação de redes colaborativas de serviços (RCSs). No mesmo cenário, os consumidores participam do processo de criação de produtos, pois a partir deles um ou vários produtos são escolhidos para serem produzidos (Figura 8). O consumidor interage por uma interface homem-computador, quando este for um ser humano, mas também interage por uma interface de *software* que atende a demandas de sistemas automatizados e/ou virtuais. Os serviços então são compostos de modo a prover a solução completa e de acordo com as características de cada demanda dos consumidores, envolvendo entidades parceiras que cuidam de todo o processo, desde a concepção e produção até a entrega do produto.

Figura 7 – Indústrias, empresas e organizações parceiras digitalizam seus processos industriais e serviços físicos.

Fonte: O autor.

Figura 8 – Consumidores requisitam serviços por meio de interfaces apropriadas, a partir das quais os serviços são compostos para atender as especificidades das demandas.

Fonte: O autor.

Observa-se assim uma relação produtor/consumidor diferente dos cenários atuais de modo que a expectativa é de um cenário onde o consumidor tem envolvimento efetivo no projeto e a criação de produtos (Figura 9). Ambientes integrados e colaborativos permitem a participação de engenheiros e centros de pesquisa e desenvolvimento e outras entidades afins, bem como, a coparticipação de consumidores no projeto e criação de novos produtos. Por meio de aplicativos integrados de engenharia, expostos na computação em nuvem e acessível via *Web*, independente de localização geográfica, equipes podem contribuir umas com as outras para criarem novos produtos para atender as demandas e especificidades dos consumidores. Da mesma forma, um ambiente integrado dispõe de ferramentas para prototipagem e análise inclusive via simulação, de tal forma que o consumidor possa acompanhar o desenvolvimento do produto e ao mesmo tempo rever decisões antes mesmo do produto ser acabado. Ainda pode-se levar em consideração a disponibilização de ferramentas de análise e simulação, ambientes tridimensionais e realidade aumentada para a realização de testes e experimentos de produtos, assim como o desenvolvimento de ambientes remotos de aprendizagem para treinamento de operadores e para profissionais e acadêmicos interessados em conhecer algum tipo de produto ou máquina. Desta forma, o compartilhamento de conhecimentos e habilidades em uma rede colaborativa favorece o desenvolvimento das empresas para assegurar a satisfação de clientes e impulsionar as habilidades e conhecimentos dos usuários de produtos e máquinas. Para tornar isso possível, ferramentas de engenharia devem ser disponibilizadas como serviços e integradas a ambientes como componentes de *software*.

Nesta visão os produtos possuem uma identificação especial que permite o rastreamento e monitoração de acordo com suas especificidades (Figura 10). A interação com o produto se dá por meio de sensores e atuadores no ambiente em que ele se encontra. O rastreamento do produto não se limita ao produto acabado, mas também a todo ciclo de vida do mesmo. Por exemplo, um carro, equipado com um identificador único aciona automaticamente a cancela de um pedágio a partir de uma distância e aproximação segura sem a necessidade de parar. Da mesma forma, as peças do carro quando identificadas, auxiliam no acompanhamento do histórico do veículo assim como contribuir para a tomada de decisões de manutenções preventivas ou prover soluções para processos de reciclagem e descarte adequado de peças quando necessário. Por outro lado, componentes do carro com

identificadores únicos, ainda em fase de produção, permitem o acompanhamento do processo produtivo dos mesmos, assim como, permitem a interação autônoma entre produto e equipamento de manufatura de modo a determinar os encaminhamentos dos mesmos. Toda essa interação do produto e seu meio se dá por intermédio da digitalização do mesmo, ou seja, uma vez identificado e resolvido digitalmente, informações a respeito de atributos, assim como os serviços que devem ser executados sobre este, são encontradas em servidores hospedados na computação em nuvem.

Figura 9 – Ambientes integrados para projetos e criação de produtos por engenheiros e equipes de pesquisa e desenvolvimento, com a coparticipação do consumidor.

Fonte: O autor.

Figura 10 – Sensores e atuadores interagem com produtos e suas representações virtuais.

Fonte: O autor.

O universo da IoT no contexto da Indústria 4.0 é muito vasto, despontando várias vertentes a serem exploradas no que diz respeito a pesquisa e desenvolvimento.

2.4.2 Fábrica Inteligente

A fábrica inteligente (*smart factory*) é uma abordagem no sistema produtivo, onde os produtos e equipamentos possuem identificadores próprios que tornam possível o rastreamento e a monitoração dos mesmos. Neste caso, cada produto tem informações sobre seu histórico, situação atual, e rotas alternativas para chegar ao seu destino (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013). Aqui os equipamentos da linha de montagem e produtos se comunicam durante o processo de fabricação. Ao

mesmo tempo unidades fabris e parceiros, mesmo que situados em locais dispersos, formam redes colaborativas para trocar informações sobre processos de produção, assim como para apoio aos sistemas de compra, venda, logística e estoques. A fábrica inteligente está assim incorporada a redes colaborativas de serviços entre empresas e é caracterizada pela engenharia fim-a-fim (sistemas de engenharia completos, envolvendo todos os processos, desde a concepção até a produção do produto) que englobam tanto os processos de manufatura quanto os produtos manufaturados, convergindo para uma relação mais estreita entre o mundo real e o virtual (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

Na fábrica inteligente os produtos são manufaturados de acordo com os requisitos dinâmicos do consumidor e os processos de negócios e engenharia permitem mudanças da produção de última hora (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013). Essa abordagem muda os comportamentos e a cadeia de valores do processo produtivo, o que acarreta em novos desafios para a indústria, tais como, segurança (dados e operações), confiabilidade, desempenho dos sistemas de comunicação, forma de localizar e identificar recursos, controle e monitoração remotos, e outros (BRETTEL et al., 2014).

De acordo com MacDougall (2014) a fábrica inteligente é composta por redes colaborativas de indústrias suportada por tecnologias baseada na computação em nuvem, onde a indústria é apoiada por CPSs e a IoT, e as máquinas são capazes de se comunicarem entre si e com produtos em processo de manufatura (comunicação M2M – *Machine to Machine*) (Figura 11). No ambiente da fábrica inteligente, os produtos carregam informações particulares que auxiliam no controle e monitoração e também possuem as coordenadas para cada processo produtivo. Os produtos e materiais munidos dessas informações oferecem a sua rastreabilidade, o que viabiliza um controle efetivo do ciclo de vida dos produtos.

De acordo com Building [...] (2014), a presença do conceito de IoT é essencial para a fábrica inteligente. A IoT tende a ser cada vez mais pervasiva no setor industrial, onde o fluxo de informação e a tomada de decisões são mais eficientes, com maior receptividade do mercado pela conexão de dispositivos computacionais e *software* em processos operacionais e negócios. Ainda, na automação o uso da IoT e as redes de comunicação, como a *Internet*, são usadas para conectar equipamentos dentro da planta industrial e favorecer a otimização dos sistemas de produção. Desta forma, as máquinas e sistemas são conectados dentro da indústria, e fabricantes

usam as informações para automatizar o fluxo de trabalho para manter e otimizar o sistema de produção com menor intervenção humana.

Figura 11 – Elementos da fábrica inteligente.

Fonte: DFKI (2012) apud MacDougall (2014).

2.4.3 IoT, CPS e fábrica inteligente no contexto da Indústria 4.0

Os CPSs e a IoT são as bases da I4.0. De acordo com Dengler e Blocher (2015), a I4.0 coloca a IoT dentro da fábrica e pela integração das tecnologias de produção com sistemas de tempo real, eles se tornam sistemas de produção ciber-físicos, que juntos devem formar a fábrica inteligente para alcançar a produção sustentável de produtos com diferentes opções e escalas. A Figura 12 apresenta a relação de ambos com a I4.0. Os CPSs estão associados com a integração de tecnologias computacionais com processos físicos (SHI et al., 2011) e são baseados em uma estrutura composta por sistemas embarcados e ambientes físicos, na qual se tem a computação ubíqua de modo a oferecer todo tipo de informação em qualquer lugar e em qualquer tempo (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013). Tecnologias de comunicação e serviços utilizadas em aplicações distribuídas para provisão de serviços e tecnologias de sistemas embarcados, tais como, robôs, sistemas de

controle, sensores e atuadores exploram as funcionalidades da *Web* e são disponibilizados na forma de serviços virtuais.

Figura 12 – Os CPSs, a IoT, os serviços e a computação em nuvem no contexto da I4.0.

Fonte: Pisching et al. (2015a).

O conceito de CPS é considerado em ferramentas e equipamentos de chão de fábrica para integração dos processos de manufatura, assim como para permitir a comunicação M2M (JAZDI, 2014). De acordo com Pauker et al. (2016) os CPSs combinam as tecnologias de produção convencionais e as TIC, permitindo que máquinas e produtos troquem informações, realizem ações e controlem outros componentes de forma autônoma. Desta forma, os equipamentos industriais convencionais coexistem com máquinas e equipamentos projetados para a I4.0, de tal modo que os sistemas de produção existentes atuem juntamente com os sistemas da I4.0. A infraestrutura baseada em CPS deve considerar a comunicação entre sistemas físicos e virtuais. Por meio de sistemas virtuais se projeta, modela e simula produtos e serviços que são processados/produzidos por ambientes do mundo real. Por outro lado, os processos físicos para a manufatura de produtos são especificados e visualizados em ambientes virtuais, tais como ambientes tridimensionais ou ambientes de realidade aumentada (KOPÁCSI; KOVÁCS; NACSA, 2013; MACDOUGALL, 2014).

Recursos desenvolvidos considerando os CPSs e a IoT são assim digitalizados e disponibilizados como serviços em uma infraestrutura baseada na computação em nuvem, na qual é possível armazenar, trocar, compartilhar e processar dados. Neste contexto, as empresas parceiras publicam e compartilham serviços e processos de manufatura. Logo, todos os recursos são usados em ambientes integrados e colaborativos para conceber e projetar bens e serviços, sejam por empresas

convencionais, mas também por empresas virtuais (PISCHING et al., 2015a). Estes fatores são favoráveis às empresas e aos consumidores, pois contribuem para a inovação de projetos e produtos para um mercado cada vez mais dinâmico, sofisticado e exigente. Os CPSs com a IoT são a base para a digitalização dos processos físicos possibilitando a formação das redes colaborativas de serviços e também favorecendo a integração vertical do sistema produtivo (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

2.4.4 *Serviços e a Indústria 4.0*

As tendências na demanda por produtos personalizados e nos prazos devidos (*time-to-market*) necessita de uma composição eficaz e eficiente de serviços do sistema produtivo e requer uma estrutura reconfigurável de forma a manter a competitividade em meio aos desafios de um mercado globalizado (SOUIT et al., 2013; DA SILVA et al., 2015).

Segundo as recomendações apresentadas por Kagermann e Riemensperger (2014), que trata especificamente de serviços inteligentes de abrangência mundial, existe uma crescente demanda pela definição de padrões e normatização para a composição deste tipo de serviço.

A composição de serviços trata da operacionalização para unir virtualmente um conjunto de serviços que possam atender a requisições personalizadas e sob demanda de consumidores (SHENG et al., 2014). A integração de serviços caracteriza uma RCS (Rede Colaborativa de Serviços) que também cria novas oportunidades de mercado. Uma RCS envolve um ou mais parceiros, cujas atividades fins são unidas para prestar serviços de interesses comuns. O propósito da formação de serviços compostos por meio de RCSs é permitir que empresas se unam para melhorar e ao mesmo tempo ampliar suas habilidades, conhecimentos, competências e capacidades, e assim terem alternativas para se tornarem mais fortes e competitivas diante de um mercado de negócios cada vez mais exigente com relação a prazos, qualidade, preços, entre outros fatores, e ter uma maior participação no mercado globalizado (MACDOUGALL, 2014; PISCHING et al., 2015a). Assim como em redes sociais, onde indivíduos ampliam suas redes de contatos por meio de contatos de seus contatos diretos, as RCSs industriais visam ampliar a oferta de serviços por meio de parceiros diretos e indiretos.

No contexto da indústria, as instalações físicas e os recursos que possuem estados, informações, funções e modos de operações são considerados como serviços (WANG; XU, 2013). Para isso é necessário que eles sejam digitalizados e disponibilizados na forma de serviço. Estes serviços são descritos, publicados, localizados e utilizados por meio da *Internet*, cujo propósito é executar ações como respostas de pedidos realizados entre provedores e consumidores de serviços (DUSTDAR; PAPAOGLOU, 2008). Os serviços, quando atuando individualmente, podem não responder às demandas, contudo, a combinação de dois ou mais serviços disponíveis por diferentes empresas executam tarefas simples ou complexas (DUSTDAR; PAPAOGLOU, 2008; LIU; SU, 2011), e assim atender às demandas de acordo com a disponibilidade.

Na I4.0 os CPSs são vistos como componentes. Quando componentes são publicados em um ambiente colaborativo, eles são usados para compor serviços que objetivam resolver problemas de interesse comum (LIU; SU, 2011; DA SILVA et al., 2012).

Em complemento à Figura 12, que enfatiza a digitalização de serviços, a Figura 13 mostra uma situação onde parceiros e partes interessadas, implantam e disponibilizam seus serviços virtuais em uma infraestrutura baseada na computação em nuvem de modo a permitir o estabelecimento de empresas virtuais, cuja estratégia está centrada no trabalho colaborativo para prover soluções de acordo com a demanda de consumidores. Para tanto, o consumidor, seja ele um sistema autônomo ou não, requisita um serviço por meio do ambiente virtual. Logo, um sistema executando em segundo plano sobre a infraestrutura baseada na computação em nuvem verifica a disponibilidade dos serviços e a melhor forma de executá-lo, para então, compor o serviço para atender a demanda do consumidor. Assim que o serviço é composto, a comunicação do sistema virtual com o sistema físico é realizada para consolidar a sua execução.

2.4.5 *Sistemas Baseados na Computação em Nuvem e a Indústria 4.0*

Segundo Mell e Grance (2011) do NIST (*National Institute of Standards and Technology* do Departamento de Comércio dos Estados Unidos), a computação em nuvem é uma estrutura que permite acesso à rede de informação de forma ubíqua, sob demanda e conveniente para um conjunto compartilhado de recursos computacionais configuráveis, tais como, redes de comunicação, servidores de banco

de dados, de aplicativos e de serviços virtuais, que são disponibilizados e liberados com base na política de gerenciamento ou interação com o provedor do serviço. Sobre a computação em nuvem as aplicações, plataformas e infraestrutura de soluções são disponibilizadas na forma de serviços por meio de redes de comunicação públicas e/ou privadas (BECHTOLD et al., 2014). Para Xu (2012), a principal característica da computação em nuvem é fornecer serviços computacionais sob demanda com alta confiabilidade, escalabilidade, heterogeneidade e disponibilidade em um ambiente computacional distribuído.

Figura 13 – Parceiros digitalizam, publicam e compartilham seus recursos físicos como serviços virtuais de modo a prover soluções para atender demandas específicas de mercado.

Fonte: Pisching et al. (2015a)

De acordo com Mell e Grance (2011) e Xu (2012), na computação em nuvem os serviços são divididos em três modalidades, o SaaS (*Software as a Service*), o PaaS (*Platform as a Service*) e o IaaS (*Infrastructure as a Service*). O SaaS fornece aos usuários a possibilidade de executar aplicativos computacionais sobre a infraestrutura baseada na computação em nuvem. Os *software* são acessados de diferentes dispositivos clientes, tais como um navegador *Web* ou interface de *software*. O PaaS oferece aos consumidores um ambiente onde é possível implantar

os aplicativos criados ou adquiridos por eles por meio do uso de linguagens, bibliotecas, serviços e ferramentas fornecidas pelos provedores. Pelo IaaS, é fornecido aos consumidores a capacidade de processamento, armazenamento e de redes de comunicação, além de outros recursos computacionais fundamentais em que o consumidor é capaz de implantar e executar diferentes tipos de *software*, tais como, sistemas operacionais e aplicativos proprietários.

Da computação em nuvem deriva a manufatura baseada em nuvem (*cloud-based manufacturing*), proporcionando um novo paradigma de negócios para a indústria manufatureira, no qual recursos digitalizados e escaláveis dinamicamente são fornecidos como serviços que são consumidos sobre a infraestrutura da *Internet* (LU; XU; XU, 2014). De acordo com Wu et al. (2015) a manufatura baseada em nuvem está apoiada na computação em nuvem e a IoT, e por ela é possível a manufatura de produtos personalizados. Ainda, segundo Wu et al. (2015) na manufatura baseada em nuvem os recursos de manufatura são organizados de modo a oferecer aos consumidores diferentes tipos de produtos de acordo com a demanda. A manufatura baseada em nuvem, associada à colaboração e a IoT, são identificadas como pontos fundamentais de transformação dos negócios das empresas assim como do setor industrial (XU, 2012).

Lee; Kao e Yang (2014), destacam a importância da computação em nuvem no contexto da I4.0, que oferece maior poder computacional devido à flexibilidade e à capacidade de expansão de acordo com a demanda. Destaca-se ainda a forte relação da IoT com a computação em nuvem como forma de permitir a hospedagem e comunicação de grandes volumes de dados (também denominado *big data*) e serviços (GUBBI et al., 2013; BECHTOLD et al., 2014).

Por meio dos sistemas de engenharia baseados na computação em nuvem, os serviços e dados são disponibilizados e compartilhados para qualquer parceiro independente das plataformas e sistemas operacionais usados por eles. As tecnologias baseadas em nuvem são descentralizadas, e visam a publicação e compartilhamento de serviços entre membros de um projeto, assim como o acesso via equipamentos independentes de tecnologia, modelo ou marca, a informações a respeito de produtos e equipamentos, assim como a coleta e registro de dados e rotinas que definem as coordenadas para a produção de um determinado produto ou serviço.

2.5 MODELAGEM DE SISTEMAS COM A TÉCNICA *PRODUCTION FLOW*

SCHEMA E REDE DE PETRI

Considerando que a interação entre as “coisas” na I4.0 é caracterizada como um sistema a evento discreto (SED), considera-se aqui técnicas de modelagem como a rede de Petri (RdP) para a especificação da arquitetura do sistema. Uma técnica utilizada para sistematizar a modelagem desse tipo de sistema é o PFS (*Production Flow Schema*), que é útil para fazer a descrição conceitual, a partir da qual se obtém modelos em RdP para verificar e validar os comportamentos dinâmicos do sistema estudado. Por meio de modelos em PFS é especificada a estrutura da arquitetura, apresentando as interações de seus componentes como uma interface para prover transações tais como operações do tipo “pedido/resposta” em um nível conceitual. Desta forma, os fluxos das operações são descritos sem a necessidade de se preocupar com as tecnologias envolvidas na implementação do sistema.

O PFS é um grafo interpretado derivado da RdP utilizado para a modelagem de sistemas a eventos discretos (PESSOA et al., 2014) que permite a especificação do fluxo de atividades em nível conceitual, servindo como uma base efetiva para gerar modelos em RdP (DA SILVA et al., 2016). Por meio do PFS se faz uma representação *top-down* de sistemas produtivos (e seus processos) com sucessivos refinamentos que resultam em modelos em RdP que são utilizados para verificar os comportamentos do sistema (DA SILVA et al., 2012). A modelagem do sistema começa no nível mais alto de abstração, a partir do qual são aplicados sucessivos refinamentos tornando o modelo mais detalhado em cada nível. O objetivo é representar nitidamente as funcionalidades das partes envolvidas e o fluxo das operações dos processos produtivos (DA SILVA et al., 2012). De acordo com Hasegawa et al. (1999) um conceito importante tratado pelo PFS é a representação do fluxo dos itens, tais como matérias-primas, produtos, máquinas, ferramentas, ordens de execução, informações de controle, dados, entre outros.

Na Figura 14 é apresentado um exemplo de um grafo PFS com os elementos, fluxos e estruturas que são descritos por meio de uma linguagem natural facilitando a compreensão do modelo elaborado. Para representar os processos produtivos são utilizados três elementos básicos, as *atividades*²³ (elementos ativos), os

²³ A notação para os termos envolvidos em modelos RdP e PFS são escritos no formato `Courier New` para destacá-los em meio ao texto.

distribuidores (elementos passivos) e arcos orientados (utilizados para determinar o fluxo dos itens, que são classificados como fluxos primários e fluxos secundários) (MIYAGI, 1996). Um terceiro tipo de fluxo é similar ao fluxo secundário, porém sem fazer o uso de um elemento distribuidor para conectar uma atividade a outra, servindo também para representar interfaces de comunicação entre um objeto e outro (JUNQUEIRA; MIYAGI, 2006, 2009; MELO; JUNQUEIRA; MIYAGI, 2010). Esse fluxo é utilizado para representar a interface de comunicação entre módulos e componentes diferentes, principalmente quando o tipo de item que trafega entre um componente e outro é diferente, mas que depende um do outro para que as operações sejam processadas (por exemplo: enquanto que no mundo físico trafegam peças/produtos, no mundo virtual trafegam mensagens que implicam nas coordenadas do produto em seu processo físico). Os fluxos das atividades de um sistema produtivo normalmente seguem estruturas do fluxo de materiais ou de informações para orientar a funcionalidade (Figura 14), isto é, a combinação de um conjunto de atividades que, de acordo com Santos Filho et al., (2001) e Fattori et al. (2011), são: (A) sequenciais; (B) concorrentes/condicionais; (C) iterativas (repetições); (D) paralelas; e, (E) sincronizadas.

Figura 14 – Elementos, estruturas e fluxos de modelos PFS.

Fonte: Adaptado de Melo; Junqueira e Miyagi (2010) e Fattori et al. (2011).

Os elementos estruturais do PFS (atividades, distribuidores e arcos orientados) são convertidos para modelos em RdP (composto por transições, lugares e arcos). A Figura 15 (a) mostra a representação em RdP de duas atividades em PFS. Um caso especial se refere às atividades que modelam as interações entre dois módulos ou componentes diferentes. Este tipo de situação é representada pela abordagem denominada *fusão de transição* para compor um modelo em RdP (JUNQUEIRA; MIYAGI, 2009; MELO; JUNQUEIRA; MIYAGI, 2010), tal como mostra o exemplo na Figura 15 (b) (que representa a estrutura (E) da Figura 14 – interações entre as atividades [ATV_12]²⁴ e [ATV_13]). Na Figura 15 (b) ainda, consta uma marca (ponto) no lugar referente ao “Componente B”. Esta marca coloca a rede em estado disponível, habilitando a transição para iniciar um novo ciclo quando necessário.

Figura 15 – Exemplos de RdP: (a) representação de um modelo PFS em RdP; (b) a abordagem da fusão de transição para compor modelos em RdP.

Fonte: O autor.

2.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos e tecnologias que suportam a Indústria 4.0 (I4.0). Também foi realizada uma contextualização da I4.0 e mostrada uma visão geral da mesma, envolvendo a sua abrangência em diferentes setores, evidenciando que a interdisciplinaridade nesse novo cenário industrial é uma oportunidade no campo da pesquisa e desenvolvimento para diferentes áreas do conhecimento, por exemplo a engenharia, a computação e a gestão.

Observa-se que os sistemas ciber-físicos (CPSs) juntamente com a *Internet das Coisas* (IoT) são as bases para a transformação industrial que se espera na I4.0.

²⁴ No texto a notação utilizada em referência as atividades dos modelos PFS é como o exemplo a seguir: [DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE].

Os CPSs e a IoT possibilitam a fusão dos mundos físico e virtual, permitindo que as “coisas” sejam monitoradas e controladas remotamente, além de oferecer meios para que haja comunicação entre elas, auxiliando nas operações de tomada de decisão. Isso contribui para os processos de manufatura que são flexibilizados por meio da programação e intercomunicação entre as máquinas e também entre máquinas e produtos, permitindo que as máquinas executem automaticamente as operações conforme as peculiaridades dos produtos. Neste cenário, os sistemas, mesmo que sejam heterogêneos, precisam ser digitalizados e disponibilizados e que haja a integração dos mundos físico e virtual. A digitalização e disponibilização são desenvolvidas com base na tecnologia SOA e implementadas por meio de serviços *Web* (WS). A integração dos sistemas físico e virtual se dá por intermédio da tecnologia OPC UA.

Entretanto, apesar dessas soluções tecnológicas a efetiva aplicação na I4.0 não é trivial. As recomendações relatadas por Kagermann; Wahlster e Helbig (2013), Kagermann e Riemensperger (2014) entre outras, evidenciam que a I4.0 ainda está em desenvolvimento e os resultados ainda são prematuros necessitando verificações e validações. A IoT e os CPSs como solução para a integração dos mundos físico e virtual e a comunicação entre “coisas” dos sistemas de produção é uma necessidade e para isso são necessárias arquiteturas que suportem a sistemática para o desenvolvimento de projetos e implementação dos recursos de fábrica e também dos sistemas para automatizar os processos de manufatura, possibilitando desta forma a produção sob demanda e personalizada.

Do ponto de vista de técnica formal de projeto de sistemas, o *Production Flow Schema* e a rede de Petri (PFS/RdP) mostram ser efetivas para a modelagem de sistemas a eventos discretos (SED), incluindo-se aí os sistemas para a I4.0. Os trabalhos levantados neste capítulo mostraram que a I4.0 envolve diferentes conceitos e tecnologias, tornando mais complexo o seu desenvolvimento. Desta forma, para a formalização, verificação e validação de uma arquitetura de sistema para a I4.0, a técnica PFS/RdP é adotada.

No próximo capítulo é apresentada uma discussão em torno dos modelos de arquitetura de referência voltados para a IoT e I4.0 e outros trabalhos relacionadas ao objeto tema desta tese.

3 MODELOS DE ARQUITETURAS DE REFERÊNCIA PARA IOT E

I4.0

Neste capítulo são apresentados os principais modelos de arquiteturas de referência para a implementação da IoT no sentido de identificar as convergências e ao mesmo tempo os indicadores concretos para a implementação prática da I4.0. Estes modelos de arquiteturas de referência para a IoT são considerados devido sua relação com os CPSs no contexto da I4.0.

Ao longo dos anos, desde o surgimento da IoT, foram apresentadas algumas propostas de arquitetura para IoT, abordando essencialmente a forma de comunicação entre “coisas”, a sua disposição física e lógica e a comunicação entre elas num ambiente de rede de comunicação, assim como a sua representação virtual na forma de serviços e a interface com outros sistemas. São apresentadas aqui quatro propostas para a IoT, mas que convergem para um modelo de arquitetura de referência baseada em camadas que representam a interligação entre aplicativos, serviços e dispositivos físicos por meio de algum canal de comunicação. Paralelamente à IoT, tem-se o modelo de arquitetura de referência para a Indústria 4.0, denominado RAMI 4.0 (do inglês – *Reference Architectural Model for Industry 4.0*). Dada a sua relevância e foco na I4.0 o mesmo é evidentemente considerado nesse capítulo.

3.1 CONCEITOS DE ARQUITETURA E ARQUITETURA DE REFERÊNCIA

Antes de explorar as arquiteturas e os modelos de arquiteturas de referência, discute-se esses termos no contexto de *software*, haja vista que na I4.0 a integração dos mundos virtual e real envolve principalmente os recursos de *software* para automação dos processos produtivos.

Uma arquitetura é geralmente definida como a estrutura organizacional de um sistema ou componente, seus relacionamentos, princípios e orientações que servem para controlar seu projeto e evolução ao longo do tempo (GERACI et al., 1991; ISO/IEC/IEEE42010:2011, 2011). De fato, o termo arquitetura é amplamente utilizado além de sua conotação tradicional na área de construção civil, mas sempre leva em conta o senso comum, relacionado com a forma e a interação entre partes conforme o contexto de aplicação. Este é o caso de arquiteturas de sistemas computacionais, que é usado no contexto deste trabalho. Do ponto de vista de sistema, uma arquitetura

deve abordar a estrutura fundamental do sistema definido a partir da perspectiva de componentes, propósitos, relacionamentos, interfaces, processos, restrições, comportamentos, princípios e regras, características e propriedades físicas e lógicas. Segundo Pressman e Maxim (2016), a arquitetura de sistema constitui um esquema que descreve sua forma e estrutura, seus componentes e suas interações.

Por outro lado, um modelo de arquitetura de referência na área de *software* se trata de um modelo estável comumente utilizado e recomendado a partir do qual são derivadas arquiteturas concretas e específicas para um determinado domínio de aplicação (BANGEMANN et al., 2016). Segundo Adolph et al. (2016), um modelo de arquitetura de referência tem um papel nos sistemas de uma área específica de aplicação, dado o fato de descrever a estrutura da arquitetura de acordo com o tipo de aplicação, e por se tratar do ponto de partida para o desenvolvimento de ferramentas necessárias para a implantação de um sistema. Para Bassi et al. (2013) um modelo de arquitetura de referência significa um esquema abstrato (*abstract framework*) que contém um conjunto mínimo de conceitos, axiomas e relacionamentos que proveem um entendimento comum das interações entre as entidades em um determinado ambiente. Por isso, uma arquitetura pode ser definida a partir de um “modelo de arquitetura de referência” (BANGEMANN et al., 2016).

Nesse sentido, torna-se importante a investigação de modelos de arquiteturas de referência com foco na IoT e I4.0.

3.2 ARQUITETURA EM 5 CAMADAS PARA IOT

Uma arquitetura genérica baseada em 5 camadas, mostrada na Figura 16, é apresentada por Bandyopadhyay e Sen (2011). As duas camadas inferiores tratam da captura de dados, seguido de uma camada intermediária (*Internet*) que permite a troca de mensagens por diferentes meios de comunicação e, por fim, as duas camadas superiores que são responsáveis pela utilização dos dados em diferentes tipos de aplicativos.

De acordo com Bandyopadhyay e Sen (2011) cada uma das camadas oferecem funcionalidades particulares, sendo elas:

- **Tecnologia na “fronteira” da rede de comunicação – *Edge Technology***²⁵
 - Esta camada é composta de *hardware* e *software* que consiste de sistemas

²⁵ *Edge Technology* – ou também *edge computing* - é uma expressão técnica que está ligada a IoT para se referir às tecnologias capazes de processar e armazenar informações e que são hospedadas

embarcados, leitores de etiquetas RFID e redes de sensores. As funções desta camada são aquelas destinadas à coleta de informação de um sistema ou ambiente, processamento de informação, armazenamento de informação, suporte à comunicação, controle e acionamento de atuadores.

Figura 16 – Arquitetura em camadas da IoT.

Fonte: Bandyopadhyay e Sen (2011).

- **Gateway de acesso – Access Gateway** – Esta camada é responsável pela compatibilização de dados e também pela disponibilização e roteamento de mensagens e assegurar a comunicação entre plataformas.
- **Aplicativos intermediários – Middleware** – As principais funções desta camada são gerenciamento de dispositivos e gerenciamento de informações. Também atua com filtro de dados, agregação de dados, análise semântica, controle de acesso, descoberta de serviços e informações, tais como, código de produto eletrônico (EPC – *Electronic Product Code*) e serviço de nomes de objetos (ONS – *Object Naming Service*). Por fim, vale destacar que esta camada atua como uma interface entre o *hardware* dos dispositivos e os aplicativos de usuário/sistema.
- **Aplicativos – Applications** – Esta camada tem por função a disponibilização de aplicativos para usuários/sistemas de um ambiente

em dispositivos situados nas “bordas” ou “extremidades” das redes de computadores. Diferente da computação em nuvem, onde o armazenamento e processamento de dados se concentram em grandes servidores, na *edge computing* essas capacidades estão em pequenos dispositivos, cada qual executando operações e trocando informações de forma autônoma com outros dispositivos conectados à rede de comunicação. Na Indústria os CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) são exemplos de dispositivos com essas capacidades. Essa expressão também é referenciada como *fog computing*, que implica no processamento de dados desde as extremidades da rede de comunicação até a computação em nuvem – *cloud computing* (IOTWF, 2014; RAPHAEL, 2016; KRILL, 2017; RIO, 2017).

basead na IoT. Os aplicativos são utilizados em diferentes setores, tais como: manufatura, logística, estoque, saúde, etc.

De acordo com Bandyopadhyay e Sen (2011) a IoT se torna a base para o desenvolvimento de serviços e aplicações independentes, caracterizados pelo alto grau de autonomia da aquisição de dados, transferência de eventos, conectividade em rede de comunicação e interoperabilidade. Ainda, Bandyopadhyay e Sen (2011) citam alguns tecnologias chaves para a IoT:

- Tecnologia de identificação – A função da identificação é mapear um único código identificador (UID – *Unique Identification*) para um objeto de modo que ele possa ser identificável e recuperável sem ambiguidade.
- Arquitetura para IoT: As arquiteturas propostas para *middleware* IoT (sistemas intermediários para compatibilizar sistemas heterogêneos) giram em torno da tecnologia SOA. A adoção dos princípios de SOA permitem a decomposição de sistemas complexos e monolíticos em aplicações consistindo de ecossistema de componentes bem definidos.
- Tecnologia de rede de comunicação – As implantações da IoT requerem desenvolvimento de tecnologias de redes de comunicação adequadas para a implementação das expectativas da IoT para chegar aos objetos físicos e trazê-los para a *Internet*. Tecnologias como RFID, comunicação sem fio de curta distância, e rede de sensores são meios para alcançar a conectividade em rede de comunicação, enquanto o protocolo IPv6 (*Internet Protocol version 6*), com seu espaço de endereço expandido, permitem endereçamento, conexão e rastreamento de um número maior de “coisas”.
- Mecanismos de descoberta de rede – No paradigma IoT, as redes mudam dinamicamente sua estrutura e evoluir continuamente. As “coisas” têm diferentes graus de autonomia. Novas “coisas” são adicionadas e topologias de rede são alteradas rapidamente. Neste cenário, mecanismos de descoberta automática e capacidade de mapeamento são essenciais para a eficiência da rede e o gerenciamento da comunicação.
- Tecnologias de busca e descoberta – A IoT também exige o desenvolvimento de serviços de pesquisa ou de referência para ligar “coisas” a informações e serviços e para apoiar o acesso seguro a informações e serviços de uma forma que satisfaça tanto a privacidade dos indivíduos como a confidencialidade de informações de negócios. Tal correspondência entre

solicitante e o provedor de serviços de informação é baseada em relações de confiança. Considerando que uma “coisa” inteligente se move através do mundo físico, ela encontra novos ambientes, e ambos, a “coisa” inteligente e outros sistemas que estão realizando monitoração ou sendo monitorados exigem mecanismos de pesquisa a fim de descobrir quais recursos estão disponíveis dentro do ambiente local em que a “coisa” se encontra. Tais recursos incluem a disponibilidade de sensores e atuadores, interfaces de rede de comunicação, instalações para computação e conversão de dados em informação, bem como instalações para posterior transporte, manuseamento, transformação física ou alerta a um operador humano sobre os problemas.

Bandyopadhyay e Sen (2011) também fazem uma colocação a respeito da aplicação da IoT na indústria de manufatura. De acordo com Bandyopadhyay e Sen (2011), ao vincular “coisas” com tecnologia da informação, seja por meio de dispositivos inteligentes incorporados ou por meio do uso de identificadores únicos com suporte ao acesso a dados, os processos de produção são otimizados e todo o ciclo de vida dos recursos são monitorados. Ao marcar itens e recipientes, uma maior transparência é obtida sobre o estado do chão de fábrica, a localização e disposição dos lotes, assim como a situação atualizada de máquinas do sistema de produção.

3.3 IOT-ARM

Um modelo de arquitetura de referência para IoT (IoT-ARM – *IoT Architectural Reference Model*), independente de interesses particulares empresariais e considerando apenas aspectos técnicos, foi proposto pela IoT-A²⁶ como resposta à busca de padrões para a IoT, cujo tema foi sugerido no *workshop*²⁷ “*Beyond RFID – The Internet of Things*” em 2008 co-organizado pela EPoSS (*European Technology Platform on Smart Systems*)²⁸ (BASSI et al., 2013). Para Bauer et al. (2013) o objetivo de um modelo de arquitetura de referência na IoT é estabelecer uma base e uma linguagem comum para arquiteturas e sistemas destinados à IoT. Os objetivos do IoT-

²⁶ IoT-A project: *Internet of Things – Architecture* (<http://www.iot-a.eu/public>). Este projeto foi financiado pela União Europeia (UE) e realizado entre 2010 e 2013. Mais de 50 cientistas e pesquisadores contribuíram para o desenvolvimento do ARM (*Architectural Reference Model*) para a IoT (KRAMP; VAN KRANENBURG; LANGE, 2013). Maiores informações sobre o projeto também podem ser encontradas no *site* <http://www.meet-iot.eu/iot-a-deliverables.html>.

²⁷ <http://www.smart-systems-integration.org/public/news-events/newsletters/eposs-newsletter/newsletter-1-2008/#joint-european-commission-eposs>

²⁸ EPoSS → www.smart-systems-integration.org

ARM giram em torno da conexão de sistemas, arquiteturas e aplicações para a criação de sistemas abertos e ambientes com plataformas integradas. Kramp; van Kranenburg e Lange (2013) destacam que o IoT-ARM pode ser usado para desenvolver arquiteturas específicas para IoT.

O IoT-ARM é apresentado na Figura 17. O modelo está organizado em 9 grupos funcionais (GF) distintos, sendo 7 deles correspondentes ao fluxo das interações entre aplicação e dispositivos (grupos longitudinais), sob a gestão de 2 grupos – gerenciamento e segurança – que cuidam das operações de integração dos grupos funcionais num ambiente IoT (grupos transversais).

Figura 17 – IoT-ARM - Modelo de arquitetura de referência para IoT.

Fonte: Bauer et al. (2013a, 2013b).

Os objetivos de cada GF (Figura 17), segundo Bauer et al. (2013) e Bauer et al., (2013a), são descritos nos itens seguintes.

- **Dispositivo – Device** – Este GF é responsável por realizar as interações entre entidades físicas e entidades virtuais gerando uma pseudo entidade composta por esse par (entidade física – entidade virtual) que é visto como uma extensão de qualquer um dos dois. O dispositivo faz a ponte do mundo físico com o mundo virtual. Isto é realizado pela monitoração, sensoriamento, atuação, computação, armazenamento e processamento. O dispositivo deve ser apto para ser operado tanto no mundo físico quanto no virtual.

- **Comunicação – *Communication*** – Este GF abstrai uma variedade de esquemas de interação derivados de várias tecnologias pertencentes aos sistemas de comunicação IoT e fornece uma interface comum para o GF ‘**Serviço IoT**’²⁹. Ele fornece uma interface simples para instanciação e para gerenciamento do fluxo de informações de alto nível.
- **Organização de Serviço – *Service Organization*** – Este GF atua como um ponto central de comunicação de serviços entre outros grupos funcionais. Ele é baseado na SOA provendo funções relacionadas à composição e orquestração de serviços de diferentes níveis de abstração. Ele faz a vinculação das requisições de serviços originadas de outros GFs, tais como, ‘**Gerenciamento de Processos IoT**’ ou ‘**Aplicação**’ externa, aos serviços relacionados com recursos³⁰. Ele também permite a associação de entidades com esses serviços por meio da utilização do GF ‘**Entidade Virtual**’, de tal forma que uma tradução de requisições de alto nível possam lidar com propriedades de entidades de serviços da IoT. De modo a permitir consultas a ‘**Entidade Virtual**’ ou ‘**Serviço IoT**’ que estão associadas a entidades físicas, este GF é responsável por resolver e orquestrar os serviços da IoT e também lidar com a composição dos serviços de modo que serviços compartilhados possam ser utilizados por entidades parceiras (outras “coisas”). Este GF está intimamente ligado ao GF ‘**Gerenciamento de Processos IoT**’, uma vez que é ele que permite a processos ou aplicativos externos encontrar e vincular serviços que possam ser usados para executar operações de um processo ou serem integrados com aplicativos externos.
- **Serviço IoT – *IoT Service*** – Este GF contém funcionalidades para descoberta, localização e resolução de serviços do GF ‘**Serviço IoT**’.
- **Entidade Virtual – *Virtual Entity*** – Este GF prevê funções que permitem a interação com sistemas IoT via entidades virtuais, bem como funcionalidades para descoberta e localização de serviços que possam prover informações sobre entidades virtuais ou que permitam interações

²⁹ A notação utilizada no texto para se referir as camadas de arquiteturas é igual ao exemplo: ‘**o nome da camada envolvida por aspas simples e em negrito**’.

³⁰ Recursos – *Resources* – de acordo com (BAUER et al., 2013b) são componentes de *software* que fornecem algum tipo de funcionalidade. Quando associados a uma entidade física, eles podem prover algum tipo de informação ou permitir a mudança de estados do mundo virtual ou digital pertencentes a uma ou mais entidades físicas.

entre elas. Adicionalmente, este GF contém todas as funcionalidades necessárias para gerenciar associações entre entidades virtuais compartilhadas por meio da verificação da capacidade e disponibilidade das mesmas. Esta demanda é requisitada devido à mobilidade das entidades físicas que têm seu par (entidade virtual) representadas no GF **‘Entidade Virtual’**. Desta forma são realizadas as operações sobre elas, tais como, acessar suas informações e acionar dispositivos atuadores para realizar um determinado tipo de operação, como por exemplo, uma esteira transportar um produto até um certo local conforme a informação contida no produto.

- **Gerenciamento de Processos IoT – *IoT Process Management*** – Refere-se à integração conceitual de sistemas de gerenciamento de processos (negócios). O objetivo geral deste GF é prover os requisitos funcionais para integrar as particularidades do mundo da IoT em processos/negócios convencionais.
- **Aplicação – *Application*** – É um GF que permite as interações com outros sistemas IoT e compreende componentes físicos ou digitais (serviços ou aplicativos) necessários para a interação com as entidades físicas.
- **Gerenciamento – *Management*** – O GF **‘Gerenciamento’** combina funcionalidades que são necessárias para governar um sistema IoT, tais como, funcionalidade de redução de custos, funcionalidade de resolver problemas de uso inesperado, funcionalidade de manipular falhas e problemas relacionados à flexibilidade.
- **Segurança – *Security*** – O GF **‘Segurança’** é responsável por garantir a segurança e a privacidade.

3.4 ARQUITETURA BASEADA EM SERVIÇOS COM FOCO NA IOT

No trabalho de Xu; He e Li (2014), sob a perspectiva de funcionalidades, é apresentada uma arquitetura orientada a serviços de 4 camadas para a IoT (Figura 18).

Figura 18 – Arquitetura em 4 camadas da IoT.

Fonte: Xu; He e Li (2014).

Xu; He e Li (2014) descrevem cada camada da seguinte forma:

- **Sensoriamento – Sensing** – Esta camada é integrada com o *hardware* (tais como RFID e sensores) para monitorar/controlar o mundo físico e também para fazer a leitura de dados. Nesta camada os sistemas inteligentes sem fio com etiquetas ou sensores são capazes de detectar e trocar informações entre dispositivos diferentes de forma autônoma. De acordo com Xu; He e Li (2014), em alguns setores da indústria, esquemas de implantação de serviços inteligentes e um identificador exclusivo universal (UUID – *Universal Unique Identifier*) são atribuídos a cada serviço ou dispositivo quando necessário, facilitando a identificação e recuperação dos mesmos.
- **Rede de comunicação – Network** – É a camada que fornece suporte aos serviços de rede de comunicação e transferência de dados sobre a rede. Esta camada também deve conectar todas as “coisas” e permitir o compartilhamento de informações entre elas.
- **Serviço – Service** – Nesta camada os serviços são criados e geridos. Ela oferece serviços para atender as demandas de usuários e sistemas. Esta camada baseia-se em um *middleware* para fornecer funcionalidades para integrar serviços e aplicações de forma transparente na IoT. Esta camada também é responsável por processar todas as questões relacionadas à orientação a serviços, incluindo a troca de informações e armazenamento, gerenciamento de dados, mecanismos de buscas e comunicação. Nesta

camada encontram-se componentes voltados à orientação a serviços, entre eles destacam-se: (a) descoberta de serviços – localiza objetos que oferecem informações e serviços necessários para uma determinada operação; (b) composição de serviços – permite a interação e comunicação entre “coisas” conectadas; e, (c) API de serviços (*Service Application Program Interface*) – oferece suporte às interações entre serviços requisitados na IoT.

- **Interface de sistema – *Interface*** – Esta camada oferece os meios de interação para usuários e outros aplicativos envolvidos no ambiente da IoT com as camadas inferiores.

3.5 MODELO DE ARQUITETURA DE REFERÊNCIA DA CISCO, IBM E INTEL

A proposta de um modelo de arquitetura de referência para IoT, baseada em 7 camadas, foi apresentada no fórum mundial de IoT em 2014 (*IoT World Forum 2014*³¹) por um grupo de três empresas: Cisco, IBM e Intel. O modelo de referência foi criado com o propósito de orientar e prover definições claras para o desenvolvimento de soluções para a IoT, pois, segundo o IoTWF (2014), não há uma forma padrão para descrever e explicar uma arquitetura para a IoT. As camadas dessa arquitetura de referência são mostradas na Figura 19.

Uma descrição de cada uma das camadas mostradas na Figura 19 é apresentada na Tabela 1 segundo o que foi apresentado em IoTWF (2014). Destaca-se que os dados fluem em ambos os sentidos entre as camadas. Logo, para atuação, os dados fluem da camada 7 para a camada 1, enquanto que, para monitoração os dados fluem no sentido contrário.

3.6 RAMI 4.0

O RAMI 4.0 (*Reference Architectural Model for Industry 4.0*), apresentado na Figura 20, é um modelo de arquitetura de referência para a Indústria 4.0 (ADOLPHS et al., 2015) que foi apresentado na feira industrial de Hannover na Alemanha em abril de 2015. Ele é uma adaptação e expansão do SGAM (*Smart Grid Architecture Model*) para atender os requisitos da I4.0 (ADOLPH et al., 2016). O RAMI 4.0 foi concebido a

³¹ IoTWF – *Internet of Things World Forum* (<https://www.iotwf.com/>)

partir de normas vigentes do setor produtivo visando concentrar diferentes especificações em um único modelo tridimensional para atender a integração vertical, horizontal e engenharia fim-a-fim. Dentre as normas utilizadas no RAMI 4.0 destacam-se: ISO/IEC 62264 (*Enterprise-control system integration*); IEC 62541 (*OPC Unified Architecture*); IEC 61512 (*Batch Control Part 1: Models and Terminology*); IEC 62890 (*Life-cycle status*) (DORST et al., 2016).

Segundo Adolphs et al. (2015) os conceitos e métodos descritos nas normas selecionadas necessitam de revisões para determinar até que ponto eles são adequados para aplicações no ambiente da I4.0. A adoção do RAMI 4.0 facilita a implementação de sistemas e arquiteturas para a I4.0 por meio de soluções não proprietárias de sistemas existentes, permitindo que as indústrias possam acompanhar a transição dos sistemas legados para sistemas com foco na I4.0. Conforme Adolphs et al. (2015), o RAMI 4.0 considera a flexibilidade para a descrição e implementação da I4.0 levando em conta a migração dos sistemas atuais para sistemas da I4.0.

De acordo com (LANGMANN; ROJAS-PEÑA, 2016b), o RAMI 4.0 oferece um modelo de arquitetura de referência para sistemas da I4.0. Para Dorst et al. (2016), o RAMI 4.0 serve como base para definições dos detalhes e relações envolvidas na I4.0. A Figura 20 apresenta as camadas e níveis propostos neste modelo, os quais são explicados a seguir.

Figura 19 – Modelo de referência em 7 camadas para IoT.

Fonte: IoTWF (2014).

Tabela 1 – Descrição das camadas do modelo de referência da IoT segundo IoTWF (2014).

Camada	Descrição	Funcionalidades
1 Dispositivos físicos e controladores <i>(Physical Devices & Controllers)</i>	São os dispositivos e controladores que controlam múltiplas plantas e processos. Neste nível estão as “coisas” físicas e incluem uma série de dispositivos que enviam e recebem informações.	Conversão de sinal analógico para digital (se necessário); Geração de dados; Realização de consultas e controle por meio de serviços de rede; Detecção e identificação de “coisas”.
2 Conectividade <i>(Connectivity)</i>	Nesta camada são tratadas as operações de comunicação e conectividade e sua principal função é a transmissão de informações precisas e confiáveis.	Comunicação com e entre os dispositivos da camada 1; Entrega confiável de dados através da rede de comunicação; Implementação de vários protocolos; Chaveamento e roteamento; Traduções entre protocolos; Segurança em nível de rede.
3 Computação na “borda” <i>(Edge Computing)</i>	É a camada responsável pela conversão de dados que fluem pela rede para informações apropriadas para seu armazenamento e processamento no nível superior (nível 4).	Agregação, limpeza e filtragem de dados; Inspeção do conteúdo dos pacotes; Avalia se os dados devem ser processados em um nível superior; Geração de eventos.
4 Armazenamento de dados <i>(Data Accumulation)</i>	Dados em movimentos são convertidos para dados armazenados (<i>from data in motion to data at rest</i>). Esta camada determina as ações sobre os dados: - que podem interessar a outras camadas; - que podem ser persistidos; - que podem necessitar um tipo específico de armazenamento; - se os dados estão organizados apropriadamente; ou, - se os dados devem ser reagrupados ou recompilados. Esta camada é responsável por armazenar dados que podem ser acessados por aplicativos quando necessário.	Filtragem e amostragem de eventos; Comparação de eventos; União de eventos para CEP (<i>Complex Event Processing</i>); Avaliação de regras baseada em eventos; Agregação de eventos; Persistência de eventos (sobre armazenamento).
5 Abstração de dados <i>(Data Abstraction)</i>	Esta camada está centrada na representação de dados e seu armazenamento de forma que permitam desenvolver aplicativos relativamente simples, com melhor capacidade de desempenho.	Cria esquemas e visões de dados na forma útil para os aplicativos; Combina dados de diferentes fontes, simplificando a aplicação; Filtragem, seleção, formatação de dados para servir aplicativos clientes; Harmoniza as diferenças, formatos, semântica, protocolos de acesso e segurança dos dados.
6 Aplicação <i>(Application)</i>	Nesta camada ocorre a interpretação da informação. Os <i>software</i> desta camada interagem com os dados armazenados e a camada 5. Os aplicativos podem variar de acordo com o tipo de domínio de aplicação, a natureza dos dados de dispositivos e as demandas.	Aplicativos de controle; Aplicativos móveis; <i>Business Intelligence and Analytics</i> .

<p>7 Colaboração e Processos (Collaboration & Processes)</p>	<p>Esta camada tem o propósito de organizar processos de negócios colaborativos que envolvem grupos de pessoas e organizações e que usam diferentes tipos de aplicativos. Considerando a dimensão da <i>Internet</i> e suas “coisas”, frequentemente há ações que requerem mais do que uma pessoa ou empresa, logo, elas devem estar aptas a se comunicarem e colaborarem umas com as outras, de modo a tornar a IoT mais útil.</p>	<p>Ubiquidade; Colaboração.</p>
---	---	-------------------------------------

Figura 20 – RAMI 4.0.

Fonte: Adolphs et al. (2015).

- **Níveis Hierárquicos – *Hierarchy Levels*** – É o eixo horizontal à direita da Figura 20. Essa estrutura foi elaborada com base na norma IEC 62264 (*International Electrotechnical Commission*), estabelecida para a integração de sistemas empresariais de controle. Para dar cobertura a todos os setores possíveis, e considerando os processos industriais, a automação e a gestão da indústria, de modo que são adotados os seguintes níveis hierárquicos

‘Empresa’ (**‘Enterprise’**), **‘Centro de Trabalho’** (**‘Work Unit’**), **‘Estação’** (**‘Station’**) e **‘Dispositivo de Controle’** (**‘Control Device’**) da IEC 62264 (ADOLPHS et al., 2015). Além desses 4 níveis funcionais foram adicionados mais três na composição hierárquica do RAMI 4.0 para dar suporte à fábrica inteligente. Mais próximos ao nível de produção foram adicionados os níveis **‘Dispositivo de Campo’** (**‘Field Device’**) (inserido para tratar do controle de uma máquina ou sistema de modo inteligente, por exemplo, os sensores inteligentes) e **‘Produto’** (**‘Product’**) (que leva em consideração a homogeneidade do produto a ser manufaturado e as instalações de produção com suas interdependências). Por outro lado, mais próximo ao nível de gestão, foi adicionado o nível **‘Mundo Conectado’** (**‘Connected World’**), pois a fábrica vai além das suas fronteiras individuais e alcançar parceiros externos por meio de uma rede colaborativa de serviços (RCS). De acordo com (ADOLPH et al., 2016; DORST et al., 2016) esses níveis representam aspectos fundamentais para a organização da I4.0;

- **Ciclo de Vida e Cadeia de Valor – Life Cycle & Value Stream** – Esse eixo (à esquerda da Figura 20) representa o ciclo de vida de entidades, tais como peças, produtos e instalações física da indústria, todos baseados na norma IEC 62890 que trata de instruções referentes ao gerenciamento de ciclo de vida de produtos e equipamentos;
- **Camadas – Layers** – Trata-se do eixo vertical (Figura 20) dividido em seis camadas para descrever a composição de máquinas e entidades físicas de tal forma que possam ser mapeadas para suas respectivas representações virtuais sob a forma de componentes da I4.0 (I4.0C – *Industry 4.0 Components*). As camadas são usadas para representar um panorama relacionado a mapas de dados, descrições funcionais, comportamentos de comunicação, *hardware*/ativos técnicos (*assets and technical assets*) ou processos de negócios (ADOLPHS et al., 2015), i.e., elas definem a estrutura da representação das tecnologias de informação e comunicação (TIC) de I4.0Cs. As camadas desse eixo (detalhadas na Tabela 2), conforme a Figura 20, são: **‘Ativo Técnico’** (**Asset**), **‘Integração’** (**Integration**), **‘Comunicação’** (**Communication**), **‘Informação’** (**Information**), **‘Funcional’** (**Functional**), **‘Regra de Negócio’** (**Business**).

Tabela 2 – Descrição do eixo vertical 'Camadas' do RAMI 4.0.

Camada	Descrição	Funcionalidades
Ativo Técnico (Asset)	Representa o mundo físico real, isto é, sensores, atuadores, peças, máquinas, documentos, entre outros.	Conexão passiva/ativa dos ativos com a camada de ' Integração '.
Integração (Integration)	Recurso para realizar o mapeamento do sistema físico para o virtual.	Fornecimento de informações dos ativos que podem ser processados computacionalmente. Controle auxiliado por computador (CAC – <i>Computer-Aided Control</i>) de processos técnicos. Geração de eventos dos ativos. Contém os elementos conectados a recursos de TIC, tais como leitores RFID, sensores, e Interface Homem-Máquina (IHM). A interação com operadores é possível por meio dessa camada via IHM.
Comunicação (Communication)	Faz a comunicação das camadas mais baixas com as camadas superiores permitindo o acesso às informações.	Comunicação normatizada usando formato de dados uniforme. Fornecimento de serviços para o controle da camada ' Integração '.
Informação (Information)	É a fonte de dados necessários para o controle dos ' Ativo Técnico '	Descrição formal de papéis. Persistência dos dados representando os modelos. Garantia da integridade dos dados. Fornecimento de dados. Tratamento de dados e disponibilização à camada ' Funcional '.
Funcional (Functional)	Representa as funções dos ' Ativo Técnico ' e permite também a interação com eles. Oferece serviços básicos para os ' Regra de Negócio '.	Descrição formal das funções. Ambiente para execução dos serviços com suporte à ' Regra de Negócio '. Ambiente de execução (<i>runtime environment</i>) para aplicativos e funcionalidades técnicas.
Regra de Negócio (Business)	Definição e realização das regras e processos de negócio. Assegura a integridade das funções na cadeia de valor.	Modelagem das regras a serem seguidas pelo sistema. Orquestração dos serviços disponíveis na camada ' Funcional '. Faz a vinculação entre diferentes processos de negócio.

De acordo com Bangemann et al. (2016), um I4.0C deve descrever em detalhes as propriedades de um CPS. Uma representação de um I4.0C é mostrada na Figura 21. Ele é um objeto global unicamente identificado com capacidade de comunicação, consistindo de um *shell*³² de administração (AS – *Administration Shell*³³) e um ativo

³² *Shell* – é um termo técnico utilizado na computação para se referir a uma interface (camada externa) entre o usuário e o núcleo de um sistema operacional por meio de um interpretador de comandos.

³³ *Administration Shell* (AS) ou *Asset Administration Shell* (AAS) – é um conceito que foi concebido para organizar a administração de ativos e recursos dentro de um sistema de TI. De acordo com Bangemann et al. (2016), trata-se de uma representação digital virtual e ativa de um I4.0C em um sistema

(Asset – ativo técnico ou “coisa”), i.e., qualquer “coisa” (“*thing*”) contendo pelo menos um meio de comunicação passiva e que seja envolvido por um AS (ADOLPHS et al., 2015; DORST et al., 2016). Nesse contexto, é o AS que dá condições de transformar uma “coisa” física em um I4.0C.

Figura 21 – Representação de Componente da Indústria 4.0 (I4.0C).

Fonte: Adolphs et al. (2015)

Um dos objetivos do I4.0C é prover dados e funções em um sistema de informação na forma de uma entidade (“coisa”). Um I4.0C particularmente pode representar um sistema de produção, uma máquina ou estação, ou até mesmo uma montagem dentro de uma máquina e, ainda, pode ser construído com base em entidades materiais ou também a partir de entidades imateriais, ou seja elementos que estão ainda na fase de concepção (BANGEMANN et al., 2016). A “coisa” física e seu ASs podem ser desacoplados, ou seja, uma peça com uma etiqueta RFID deve ter o seu AS hospedado em um servidor de sistema de TIC, isto é, nas camadas ‘**Regra de Negócio**’, ‘**Funcional**’ e ‘**Informação**’.

As características especiais do RAMI 4.0 estão nas considerações que combinam elementos do ciclo de vida e cadeia de valores com uma abordagem estruturada hierarquicamente para a definição de um I4.0C (DORST et al., 2016). As

compreendido como I4.0. O AS foi planejado para prover a representação digital de todas as informações e serviços disponíveis em torno de um objeto, seja ele um *hardware* ou uma plataforma de *software* (GRANGEL-GONZÁLEZ et al., 2016).

relações de um I4.0C com os eixos do RAMI4.0 são estabelecidos da seguinte forma: eles estão localizados ao longo do eixo **‘Camadas’** do RAMI4.0 (Figura 22) e adotam várias posições no ciclo de vida e cadeia de valores (eixo **‘Ciclo de Vida e Cadeia de Valor’**), e ocupar vários níveis hierárquicos (eixo **‘Níveis Hierárquicos’**). A conexão entre a entidade (“coisa”) e um AS é mantida com o auxílio de um dispositivo que ofereça no mínimo a comunicação passiva da entidade e do regime de comunicações compatível com a I4.0 aos níveis mais altos dos sistemas de TIC. Todos os ASs, conforme pode ser observado na Figura 23, são geridos por um sistema maior denominado SAS (*System Administration Shell*) que combina a intercomunicação dos ASs pertencentes ao sistema I4.0.

Figura 22 – A relação de um I4.0C com o eixo **‘Camadas’** do RAMI 4.0.

Fonte: O autor.

O RAMI 4.0 está intimamente ligado à indústria manufatureira e segue um conjunto de normas vigentes, i.e., ele se propõe a atender os processos dos sistemas produtivos, sejam eles locais ou remotos. Além disso, o RAMI 4.0 apresenta uma série de características especiais para atender a produção personalizada e sob demanda, oferecendo uma estrutura compatível com as arquiteturas de referência para a IoT, com um diferencial significativo que é a aplicação na fábrica inteligente (ADOLPHS et al., 2015).

O RAMI 4.0 destaca a organização, as funções, e a interatividade dos elementos envolvidos na arquitetura, mas os detalhes da implementação não são

evidenciados (LANGMANN; ROJAS-PENÑA, 2016b). Também não são explicitados os detalhes em relação à comunicação entre equipamentos e produtos para guiá-los no sistema produtivo de acordo com os passos de produção exigidos.

Figura 23 – “Coisas” com seus respectivos ASs que podem ser geridos por um sistema integrado chamado de SAS.

Fonte: O autor.

3.7 PRINCIPAIS PESQUISAS EM TORNO DA I4.0, IOT E CPS

As expectativas da adoção da I4.0 como um padrão a ser efetivamente implementado apresentam oportunidades relacionadas à pesquisa e desenvolvimento. Esta seção apresenta um panorama das pesquisas correlatas no que diz respeito à comunicação entre máquinas e produtos, bem como à organização e descoberta de equipamentos para processar operações conforme requisitos dos produtos com foco na IoT e na I4.0. Também são investigadas as pesquisas em torno das arquiteturas de referência para IoT e o RAMI 4.0.

3.7.1 Pesquisas baseadas em CPS, IoT e Serviços

Baseado em CPS, Liu e Su (2011) propõem uma arquitetura para agregação dinâmica de recursos de manufatura³⁴ na qual é considerada a digitalização e detalhes

³⁴ Recursos de Manufatura – Compreende todos os recursos presentes no ciclo de vida do produto, envolvendo desde a concepção e projeto até a comercialização e pós-venda. Existem vários tipos de recursos, tais como equipamentos, *software* e *hardware*, e informação. Os recursos podem ser classificados como lógicos e físicos (LIU; SU, 2011).

sobre os procedimentos do processo de implementação dos recursos de manufatura e a composição dinâmica de serviços. Para Liu e Su (2011) a composição de serviços para atender demandas específicas é aplicada no contexto da fábrica inteligente.

No artigo de Seiger et al. (2014) os recursos baseados em CPS são tratados como componentes para posterior modelagem de processos complexos e flexíveis para ambientes autônomos. Os autores apresentam um meta modelo de processo e usam a linguagem de modelagem unificada (UML – *Unified Modelling Language*) em uma abordagem orientada a objetos para modelar os componentes e sua composição para um dado processo. Seiger et al. (2014) sugerem um fluxo de trabalho distribuído e descentralizado entre vários pares de orquestração de modo a aumentar a disponibilidade dos processos do fluxo de trabalho. Eles também apresentam um repositório de componentes e um modelo semântico para a classificação de componentes envolvidos no processo.

Considerando que a IoT é composta por uma série de dispositivos e meios de comunicação heterogêneos e objetivando conectar “coisas” por meio de redes, Xu; He e Li (2014) destacam que a SOA é uma tecnologia chave a ser aplicada para a integração de sistemas ou dispositivos heterogêneos presentes na IoT.

3.7.2 Pesquisas sobre localização e resolução de “coisas” da IoT e OPC-UA

O trabalho desenvolvido por de Las Heras et al. (2011) no projeto IoT-ARM, descreve conceitos e possíveis soluções para a identificação e descoberta de serviços no contexto da IoT. Os autores também consideram os principais métodos de busca e descoberta serviços e “coisas”. Entre as soluções para localização e descoberta destacados no IoT-ARM estão:

- a) Abordagem orientada a domínio (*Domain-oriented approach*) baseada em uma estrutura hierárquica cujo funcionamento é similar ao DNS (*Domain Naming Service*), e chamado de ONS (*Object Naming Service*).
- b) Infraestrutura orientada à localização (*Location-oriented infrastructure*) que é baseada em áreas geográficas e cujo foco está na descoberta eficiente e escalável da descrição e associações de serviços relacionadas a entidades físicas.
- c) *Web semântica (semantic web)*, que tenta agrupar descrições de serviços utilizando um número limitado de fatores derivados de descrições de entidades físicas.

- d) Abordagem ponto-a-ponto baseada em tabelas de *Hash* distribuída (*Distributed Hashtable-based peer-to-peer*), considerada pelos autores como um modelo útil para balancear a carga de busca em sistemas de grande porte.
- e) Abordagem baseada em federação (*Federation-based approach*) que usa uma estrutura hierárquica de *clusters* federados³⁵.

De Las Heras et al. (2011) afirmam que cada uma dessas abordagens requer análises mais aprofundadas de modo a servir como base e contribuir para o projeto IoT-ARM.

Enquanto o trabalho publicado por de Las Heras et al. (2011) faz considerações a respeito da IoT-ARM, que é parte de um trabalho voltado para uma arquitetura de referência, outros autores fazem abordagens distintas em torno da aplicação de certas arquiteturas que são relatadas a seguir.

No trabalho de Espada et al. (2011) é considerado o grande volume de “coisas” físicas que estão sendo projetadas em formato virtual. Logo, o problema está centrado na identificação dessas “coisas”. Com a IoT é possível a integração e comunicação entre recursos físicos e virtuais permitindo a automatização de tarefas. No trabalho de Espada et al. (2011) é identificado que não existem formas padronizadas para obter as ações ou serviços associados às entidades virtuais, o que torna difícil a interação e integração de forma genérica com outros aplicativos, dispositivos ou sistemas embarcados. Os autores apresentam assim uma proposta detalhada em busca de uma estrutura única para construção de qualquer tipo de “coisa”.

O artigo de Engelhardt e Reinhart (2012) apresenta uma abordagem baseada em RFID para controle no chão de fábrica. Os autores consideram que a produção de modo geral é caracterizada por uma alta variedade de produtos que demandam curtos períodos de tempo para entrega, e que as informações no chão de fábrica que são indispensáveis para atingir os objetivos muitas vezes não estão disponíveis. Logo, os autores apontam que a tecnologia RFID permite uma monitoração mais precisa e adequada do chão de fábrica, e assim apresentam uma metodologia de configuração para a monitoração do ambiente fabril.

³⁵ *Clusters* na computação são servidores de aplicação espalhados pela rede de comunicação para dividir a carga de processamento entre diversos servidores e auxiliar na implementação de sistemas de informação tolerante a falhas. Os *cluster* federados têm como peculiaridade a implementação de sistemas distribuídos que residem em domínios geográficos diferentes de forma transparente para o usuário (VISÃO, 2017).

Yan et al. (2013) propõem um esquema para resolução de nomes de objetos considerando uma resolução ponto-a-ponto, cujo propósito exclusivo é identificar cada objeto na IoT. É apresentada uma introdução ao esquema de resolução, para então realizar a análise de desempenho do mesmo. O esquema apresentado é baseado no ONS (*Object Naming Service*). Nesta proposta os autores localiza o identificador do objeto e, por meio deste, encontram o local do objeto no servidor de serviços *Web*. Ou seja, as informações relacionadas ao objeto físico com sua devida identificação devem estar disponíveis globalmente como serviços *Web*. Neste trabalho fica evidente a busca por um objeto por meio de sua identificação, o que é resolvido por meio de ONS e DHT.

O artigo de Karakostas (2013) apresenta uma proposta baseada no DNS para a IoT, o que eles chamam de “DNS para IoT”. Este tem a função de traduzir identificadores únicos (URI – *Uniform Resource Identifier*) de objetos físicos para endereços da rede de objetos, a partir dos quais são obtidas as informações a respeito das “coisas” (por exemplo, *status*, localização, etc.). No trabalho de Karakostas (2013) é apresentada uma infraestrutura “DNS para IoT” com um exemplo de aplicação voltado para logística de transporte.

No artigo de Håkansson e Hartung (2014) é apresentada uma infraestrutura para tomada de decisão e negociação individualizada em CPS com dispositivos IoT. A tomada de decisão é baseada em preferências individualizadas para fornecer a melhor solução individual. A solução é discutida no domínio de assistência médica com dados e informações individuais que são acessados e comunicados por meio de um dispositivo que carrega dados pessoais pelo ambiente em que se encontra. O dispositivo é chamado de MINi-ME.

A pesquisa de Liu et al. (2014) apresenta um *framework* que usa tecnologias baseadas na IoT, tais como rede de sensores e RFID, aplicado a um processo de montagem inteligente de produtos mecânicos. A pesquisa dos autores é focada na análise das características de um sistema de manufatura baseado na IoT, bem como a identificação dos requisitos necessários para a automação inteligente capaz de executar processos com automaticamente.

O trabalho de Ungurean; Gaitan e Gaitan (2014) trata de uma arquitetura para a IoT baseada em “coisas” de um ambiente industrial. A arquitetura proposta pelos autores usa a tecnologia OPC UA (*OPC Unified Architecture*). Ela é dividida em dois

módulos chamados de servidor de dados e aplicações, por meio dos quais é possível a monitoração e controle de dispositivos físicos em tempo real.

Levando em conta a demanda por dispositivos para realizar a comunicação entre equipamentos do chão de fábrica e dispositivos da IoT, a pesquisa de Kumar e Bose (2015) descreve como usar a tecnologia OPC UA para conectar um sistema de automação existente por meio de uma infraestrutura IoT.

O trabalho de Wang et al. (2016) sugere uma arquitetura que integra tecnologias como infraestrutura baseada na computação em nuvem, rede sem fio industrial, e terminais fixos e móveis com dispositivos inteligentes tais como máquinas e produtos. O que se espera é a integração vertical da indústria que é implementada com uma fábrica flexível e reconfigurável.

As publicações de Langmann e Rojas-Peña (2016a) e Langmann e Rojas-Peña (2016b) apresentam um método para o uso de um controlador lógico programável (CLP) como um I4.0C levando em conta as orientações definidas no RAMI 4.0. O resultado do trabalho é que dispositivos de controle, tal como o CLP, pode ser integrado a um ambiente de produção usando o paradigma de serviço.

3.7.3 *Considerações sobre as pesquisas relatadas*

A composição de serviços, já explorada em outras pesquisas e em diferentes áreas do conhecimento, aplica-se à indústria visando atender especificidades dos consumidores e auxiliar na produção sob demanda nos sistemas produtivos. Porém a forma como os serviços são organizados e localizados requer soluções práticas, i.e., eficazes e eficientes.

Levando em conta o grande volume de dados e serviços no contexto do CPS e da IoT na indústria, a ampliação dos negócios entre empresas parceiras reforça a demanda pelo uso de infraestruturas baseadas na computação em nuvem para a organização e gerenciamento de entidades virtuais, dados e serviços.

A IoT-ARM é uma contribuição na evolução e aplicação da IoT, tal como o modelo de referência OSI (RM-OSI – *Reference Model for Open Systems Interconnection*) foi para as arquiteturas de redes de computadores. Porém a organização de sistemas na I4.0 requer especificações mais detalhadas, principalmente quando aplicada à implementação de casos concretos (DE LAS HERAS et al., 2011).

Analizando os trabalhos relacionados com soluções para a IoT e para a localização de serviços no contexto industrial, o trabalho de Espada et al. (2011), embora apresente uma maneira para localizar “coisas” para permitir a integração e interação entre outros dispositivos e recursos, não contempla a localização e resolução de equipamentos de uma forma estruturada e não é aplicada a IoT-ARM. Além disso não leva em consideração estruturas de redes de serviços colaborativos hierárquicos.

A abordagem de Engelhardt e Reinhart (2012) usando a tecnologia RFID para comunicação entre “coisas” no controle de chão de fábrica considera uma grande variedade de produtos, porém não aponta o uso de IoT, SOA ou computação em nuvem, caracterizando assim um controle centralizado.

Avançando na proposta de Yan et al. (2013), baseado no ONS e DHT (*Distributed Hash Table*) para localização de “coisas”, este considera o lado da comunicação entre uma “coisa” e um dispositivo de leitura, para a partir disso fazer a busca do serviço por meio da resolução de serviço. Além disso é adotada uma estrutura que contempla a comunicação da “coisa”, que carrega a lista de serviços a ser executada e os usa para localizar e resolver serviços baseado em DNS.

Os resultados obtidos no trabalho de Karakostas (2013) indicam que uma implementação baseada em DNS é viável para o rastreamento de “coisas” da IoT. Porém o mesmo não leva em consideração a aplicação deste na indústria e nem a identificação do que deve ser realizado com as “coisas”.

O dispositivo MINi-ME apresentado por Håkansson e Hartung (2014) é uma contribuição que demonstra o uso dos conceitos CPS e IoT para a interação entre dispositivos, porém o mesmo não faz menção ao uso serviços *Web*, assim como também não faz busca de operações, tão pouco usa infraestrutura da rede de comunicação para armazenar informações, ou seja, é o dispositivo MINi-ME que carrega as informações e faz comunicações. Ao mesmo tempo, Håkansson e Hartung (2014) apontam que as técnicas de comunicação e troca de informações em ambientes CPS com IoT estão em um estágio inicial e precisam ser melhor exploradas.

Os trabalhos de Ungurean; Gaitan e Gaitan (2014) e Kumar e Bose (2015), fazem uma abordagem do uso da tecnologia OPC UA para a integração dos recursos físicos com sua representação virtual no contexto da IoT e da fábrica inteligente, provendo meios para a especificação de uma arquitetura de sistema para I4.0.

A pesquisa de Wang et al. (2016) explora a integração vertical da indústria, que é um dos aspectos abordados na I4.0, para prover soluções no que diz respeito à comunicação entre máquinas, dispositivos de controle e produtos para tornar possível a manufatura flexível e reconfigurável.

Com ênfase na I4.0 e fazendo uso do RAMI 4.0, os trabalhos de Langmann e Rojas-Peña (2016a) e Langmann e Rojas-Peña (2016b) oferecem meios para digitalizar dispositivos de controle físicos em componentes da I4.0 (I4.0Cs), o que é fundamental para integrar os mundos físico e real no contexto da I4.0.

De fato, a abordagem baseada em DNS vem sendo utilizada em trabalhos para resolver nomes, dando maior enfoque no endereço (identificador) das “coisas”, mas pouco tem sido feito para a comunicação entre produto e máquina. Com uma efetiva comunicação produto-máquina as máquinas otimizam seu comportamento conforme o tipo do produto que devem processar. Outro destaque para o levantamento realizado é que não há propostas de um mecanismo para descoberta de equipamento conforme a operação a ser realizada. Foi possível notar ainda que alguns trabalhos tratam da comunicação entre produtos e máquinas e mostram as tecnologias necessárias para isso, mas elas não consideram a autonomia das máquinas para verificar suas capacidades e também não mostram a forma de guiar o produto nos processos de manufatura, tal como considerado na I4.0.

3.8 SÍNTESE DO CAPÍTULO

A carência por arquiteturas que norteiam a sistematização e implementação da IoT de forma harmônica entre as entidades envolvidas, assim como da própria I4.0, foi motivo para o desenvolvimento de modelos de arquiteturas de referência (MAR). De acordo com Weyrich e Ebert (2016), os MARs com suporte à *Internet* industrial são: (1) IoT-ARM (*Internet of Things – Architectural Reference Model* – modelo de arquitetura de referência para IoT); (2) IIRA (*Industrial Internet Reference Architecture* – arquitetura de referência para *Internet* industrial); e, (3) RAMI 4.0 (*Reference Architectural Model for Industry 4.0* – modelo de arquitetura de referência para I4.0). O primeiro é um modelo de referência elaborado por mais de 50 pesquisadores e financiado pela União Europeia entre 2010 e 2013 cujo objetivo é prover elementos e grupos funcionais básicos para o desenvolvimento de arquiteturas voltadas para aplicações específicas que envolvam a IoT, incluindo os sistemas de manufatura (BASSI et al., 2013). O segundo foi desenvolvido por membros do IIC (*Industrial*

Internet Consortium) nos Estados Unidos da América e publicado em 2015. O IIRA tem o intuito de proporcionar um modelo de referência para projetar sistemas específicos baseados em uma estrutura e conceitos comuns voltados a *Internet* das “coisas” Industrial (*IIoT – Industrial Internet of Things*) (LIN et al., 2015). O terceiro modelo de referência foi concebido na Alemanha por membros da “plataforma para Indústria 4.0” (*Plattform Industrie 4.0*) no ano de 2015 com o propósito de orientar o desenvolvimento de arquiteturas, sistemas e tecnologias para a I4.0 integrando três aspectos diferentes da indústria em único modelo, isto é, a integração vertical, a engenharia fim-a-fim e a integração horizontal (ADOLPHS et al., 2015).

A principal diferença entre os modelos é que o IoT-ARM faz uma abordagem em um nível de abstração mais alto da IoT, possibilitando o desenvolvimento de soluções para qualquer área do conhecimento. O IIRA além de ser focado em aplicações industriais, leva em conta outros aspectos, por exemplo a aplicação em projetos de casas inteligentes (*smart homes*) e controle de tráfego inteligente (*smart traffic*). Por outro lado, o RAMI 4.0 é centrado na indústria, levando em conta normas industriais já existentes, tal como a IEC 62264 que trata da integração de sistemas de controle de produção. Segundo Bangemann et al. (2016), o RAMI 4.0 descreve aspectos fundamentais da I4.0 e objetiva prover uma arquitetura de referência que sirva de base para sistemas específicos da I4.0 e que permitam a fusão do mundo físico com o virtual. De acordo com Bangemann et al. (2016) a integração do físico com o real é possível por meio da tecnologia OPC UA (*OPC Unified Architecture*).

Diante das publicações relatadas neste capítulo foram identificados os elementos fundamentais para a implantação da I4.0. Percebeu-se que a digitalização do mundo físico é uma necessidade, porém a forma e os métodos como isso pode ser realizado é ainda uma expectativa. Nota-se ainda a necessidade de uma representação de entidades virtuais (EV) que contenha os estados atualizados das “coisas”. Nesse cenário a RFID como meio de comunicação entre as “coisas” pode ser utilizada em sistemas de produção, servindo como base para a identificação única para auxiliar no rastreamento e monitoração das “coisas”. O uso de mecanismos como DNS e ONS são sugeridos para resolver nomes e localizar as “coisas” em uma rede de comunicação, o que contribui nos mecanismos de busca e descoberta de entidades em todo o ambiente de rede.

Foram apresentadas também as arquiteturas de referências para sistemas com foco na IoT e na I4.0. Dentre as arquiteturas de referências investigadas foi possível

observar a convergência para uma representação em camadas que aborda a integração das “coisas” físicas com a suas respectivas representações virtuais, envolvendo aspectos físicos (como a identificação e endereçamento das “coisas”), os meios de comunicação e integração, e a representação virtual na forma de serviços e dados que devem ser acessíveis por meio de aplicativos, isto é, a interação de CPSs por meio da IoT. Os modelos de referências IoT-ARM e o proposto durante o IoTWF (*Internet of Things World Forum*) apresentam um conjunto de camadas mais completos com detalhes para a implementação de sistemas IoT dando suporte para a criação de outras arquiteturas para fins específicos. A investigação dessas arquiteturas se deu em função da forte ligação da IoT com a I4.0, principalmente no que diz respeito à comunicação entre “coisas”. O projeto denominado Plataforma da Indústria 4.0 apresentou o RAMI 4.0 (*Reference Architectural Model for Industry 4.0*) como um modelo de referência para a implementação de sistemas para a I4.0. O RAMI 4.0, além de atender aspectos específicos desejáveis para a I4.0 também vai ao encontro das arquiteturas para IoT.

O RAMI 4.0 auxilia no desenvolvimento de sistemas e arquiteturas para I4.0, incluindo sistemas já existentes de modo que os sistemas atuais possam ser convertidos para a I4.0. O RAMI 4.0 contempla uma série de fatores para atender a produção sob demanda e personalizada, oferecendo uma estrutura compatível com as normas vigentes relacionadas à organização e definição de sistemas de produção. Contudo, o RAMI 4.0 se concentra na importância da organização das funções e a interatividade dos elementos envolvidos, mas os detalhes e procedimentos de desenvolvimento e implementação de arquiteturas não são apresentados. Adicionalmente, notou-se que ainda são poucas as publicações sobre a modelagem e simulação por meio de métodos formais para validar sistemas para I4.0. Foi evidenciado ainda que as pesquisas em torno da I4.0 e em especial ao RAMI 4.0 ainda são recentes e requerem mais estudos, principalmente no que diz respeito à implementação da I4.0 e soluções que auxiliem no processo de digitalização das “coisas” e também da interação entre produtos e máquinas para contribuir na produção sob demanda e personalizada.

O próximo capítulo trata da apresentação da arquitetura que é desenvolvida com base nas especificações do RAMI 4.0, com ênfase na integração vertical, para proporcionar a comunicação entre “coisas” e proporcionar um mecanismo de

descoberta de equipamentos como uma efetiva solução para a implementação da I4.0.

4 ARQUITETURA PARA DESCOBERTA DE EQUIPAMENTO E PROCESSAMENTO PERSONALIZADO DE OPERAÇÕES

Neste capítulo é apresentada a arquitetura desenvolvida com base no modelo de referência para a Indústria 4.0 (RAMI 4.0), onde os componentes são organizados conforme as suas camadas. É apresentada a estrutura da rede hierárquica de equipamentos (RHE), que é utilizada para organizar os equipamentos envolvidos no sistema de produção. Por fim, se tem o detalhamento da interatividade entre os componentes para mostrar o fluxo básico das operações, determinando assim os procedimentos para: (1) identificar operações a serem processadas nos produtos em processo de manufatura; (2) descobrir o equipamento para processar (executar) a operação; e, (3) configurá-lo para executar os procedimentos conforme as exigências do produto.

Vale destacar que a arquitetura apresentada neste capítulo evoluiu inicialmente de uma outra proposta de arquiteturas de referência para IoT, a IoT-ARM. Esta proposta inicial é apresentada e detalhada no Apêndice D. A arquitetura resultante aqui apresentada foi concebida após o surgimento do RAMI 4.0.

4.1 COMPONENTES DA ARQUITETURA

A arquitetura aqui proposta foi desenvolvida de acordo com o RAMI 4.0 de modo a prover as funcionalidades que permitam a orientação dos produtos em sistemas produtivos usando um mecanismo de busca hierárquico similar ao DNS (COMER, 2001; COULOURIS; DOLLIMORE; KINDBERG, 2007). Nesse sentido, a arquitetura assegura a descoberta de equipamentos para processar uma determinada operação por meio da troca de informações entre equipamentos e produtos durante os processos de manufatura. Para prover esse mecanismo, a arquitetura possui um conjunto de componentes organizados conforme as camadas do RAMI 4.0. Os componentes são mostrados na Figura 24 e uma descrição sobre cada um deles é realizada logo a seguir.

Na camada **‘Ativo Técnico’** (**‘Asset’**) estão todos os elementos físicos, tais como equipamentos, estações, máquinas, peças, entre outros. Esses elementos devem oferecer pelo menos um meio de comunicação passivo e um identificador único para permitir que sejam monitorados e administrados por operadores ou por sistemas autônomos por meio de uma interface de administração (denominado *Administration*

Shell no RAMI 4.0) integrada aos DCs (dispositivos de controle ou sistemas computacionais embarcados nos recursos físicos).

Figura 24 – Os componentes da arquitetura organizados sobre o eixo ‘**Camadas**’ do RAMI 4.0.

Fonte: O autor.

A camada '**Integração**' contém dois componentes:

- **DGOM**³⁶ – Driver para Gerenciamento de Operações de Manufatura – É responsável pela interação entre o dispositivo para leitura da identificação única do produto e o serviço para gerir as operações a serem processadas pelo sistema de produção. Esse recurso contempla duas operações básicas:
 - 1) Requisitar ao serviço responsável pelo tratamento da próxima operação a ser processada por um equipamento, o **WS_GOM** (*Web Service para Gerenciamento de Operações de Manufatura*), para encontrar e definir as configurações do equipamento para processar a operação requisitada;
 - 2) Notificar o serviço **WS_GOM** para atualizar uma operação processada por um equipamento, i.e., assim que uma operação for concluída por um equipamento (pós-operação) a "*Situação*"³⁷ (*status*) do produto sob o processo de manufatura deve ser atualizado indicando a real situação pós-operação.
- **SDDC** – Servidor de Dados do Dispositivo de Controle – Deve prover dados atualizados e permite a interação com os dispositivos de controle (DCs), oferecendo recursos para a programação dinâmica e flexível dos sistemas produtivos. No contexto do RAMI 4.0, por exemplo, esse componente está em conformidade com a tecnologia OPC-UA, que é utilizada para a integração de sistemas heterogêneos, envolvendo desde os controladores lógicos programáveis (CLP) do chão de fábrica aos sistemas corporativos, tais como MES (*Manufacturing Execution System*) e ERP (*Enterprise Resource Planning*).

Do RAMI 4.0 tem-se também a camada '**Comunicação**'. Esta camada trata de protocolos e tecnologias de transmissão de dados estáveis e normatizados, possibilitando a troca de informações entre os serviços das camadas '**Regra de Negócio**', '**Funcional**' e '**Informação**' (i.e., as camadas que compreendem uma interface de administração (*Administration shell* – AS) de um componente da Indústria

³⁶ Os componentes da arquitetura são escritos em negrito e com todas as letras em maiúsculo sempre que forem mencionados no texto.

³⁷ "*Situação*" – é um atributo utilizado para o controle das operações exigidas por um produto. Sempre que for mencionado no texto este atributo é apresentado no formato itálico e envolvido por aspas duplas.

4.0 (I4.0C)) e os recursos físicos (i.e., “coisas” de um AS). Na arquitetura proposta é considerada a tecnologia Ethernet como meio físico para a transmissão de dados e os protocolos da arquitetura TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) para o suporte à comunicação de serviços virtuais com os recursos físicos.

Na camada ‘**Informação**’ estão as bases de dados sobre os produtos a serem processados e sobre os equipamentos para processar as operações. As bases de dados são organizadas em dois segmentos:

- **EV** – Entidade Virtual – É uma base de dados que mantém as informações relacionadas à representação virtual (*Virtual Representation*), também denominado mundo informacional (*Informational World*) dos objetos físicos (*Physical Objects*) do sistema produtivo. Toda e qualquer informação atual associada ao estado do objeto físico deve ser encontrada nessa base de dados na sua forma virtual.
- **RHE** – Rede Hierárquica de Equipamentos – Trata-se de uma base de dados para armazenar os dados dos equipamentos envolvidos no sistema produtivo. Estes dados de equipamentos devem ser organizados hierarquicamente seguindo o modelo normatizado pela IEC 62264 (que sugere um modelo hierárquico dos dados dos equipamentos associados com as operações e controle de manufatura) (ANSI/ISA-95.00.01, 2010; PISCHING et al., 2015b), conforme a definição do eixo ‘**Níveis Hierárquicos**’ do RAMI 4.0 apresentado na Figura 20.

Na camada ‘**Funcional**’ se tem os componentes para a troca de informação entre os mundos físico e virtual. O componente **WS_GOM** (*Web Service* para a Gerenciamento de Operações de Manufatura) é responsável pelo serviço necessário para determinar qual é o equipamento que processa o produto no sistema de produção (via **CPO** – Configura Próxima Operação) e para atualizar a “*Situação*” de uma operação processada (via **AOP** – Atualiza Operação Processada). Para isso, o **WS_GOM** faz a mediação entre os componentes **DGOM** e **SDDC** da camada ‘**Integração**’ com os componentes **CPO** e **AOP** conforme o serviço requisitado. O componente **CPO** (Configura Próxima Operação) oferece meios para: (1) verificar a próxima operação a ser processada; (2) para descobrir um equipamento capaz de processá-la; e, (3) para configurar o equipamento para executar os processos. Por outro lado, o componente **AOP** é responsável por atualizar a “*Situação*” de uma

operação processada em um produto por um determinado equipamento. Para realizar essa operação o **AOP** necessita dos parâmetros **EID**³⁸ (identificador único do equipamento), **PID** (identificador único do produto) e **Operação** processada. O **PID** é o código dos produtos envolvidos nos processos de manufaturas, por exemplo uma etiqueta baseada em tecnologia RFID ou NFC. O **EID** é utilizado para identificar um equipamento e assim tornar possível encontrá-lo em sua representação virtual, por exemplo, pelo endereço de rede IP (*Internet Protocol address*). A **Operação** é o tipo de operação exigida pelo produto.

O componente **CPO** recebe dois parâmetros: (1) o **PID** e (2) o **EID**. O **CPO** utiliza três componentes complementares para prover a configuração do equipamento físico para processar a operação requisitada, que são:

- 1) **PPO** – Pesquisa Próxima Operação – Esse componente é responsável por verificar a próxima operação requerida por um determinado produto de acordo com o **PID**. A operação obtida é utilizada como parâmetro para realizar a descoberta do equipamento designado a processá-la.
- 2) **SLE** – Serviço para Localização de Equipamento – Esse componente tem dois parâmetros: **Operação** e o **EID**. O primeiro é a operação requisitada, enquanto o segundo é uma referência para a posição corrente do produto. Um procedimento que usa a **RHE** faz a busca do equipamento apropriado.
- 3) **CE** – Configuração do Equipamento – Esse componente é utilizado para preparar as configurações necessárias do equipamento para processar a operação requisitada. São considerados três parâmetros essenciais para a configuração, sendo eles: **PID**, **EID** e **Operação**. A **Operação** é utilizada como referência para configurar o equipamento para processá-la.

Na camada '**Regra de Negócio**' (*Business*) estão os recursos baseados na tecnologia SOA para fornecer soluções relacionados a processos de negócios, oferecendo meios para a composição, orquestração e coreografia de serviços. A SOA é adotada como o mecanismo para a integração dos mundos físico e virtual, estabelecendo políticas e regras de negócio entre as entidades participantes, além de estabelecer uma comunicação compatível, independente da heterogeneidade entre

³⁸ Os dados (parâmetros) que fluem entre os componentes da arquitetura são escritos em formato negrito e sublinhado.

eles (DORST et al., 2016). Neste trabalho é utilizado os serviços *Web* (comumente chamado de *Web Services*) como forma de implementação da SOA.

4.2 ESTRUTURA DA RHE

A estrutura da base de dados **RHE** (Rede Hierárquica de Equipamentos) é mostrada na Figura 25. No nível mais alto (topo da hierarquia) está a “*EMP*”³⁹ (Empresa), seguido de um ou mais “*Local*”, cada qual com uma ou mais “*Área*” e seus “*EM*” (Equipamento/Máquina). Os “*EMs*” são os elementos capazes de processar algum tipo de operação de manufatura (transformação tecnológica e/ou movimentação física).

Figura 25 – Organização da base de dados RHE - Rede Hierárquica de Equipamentos.

Fonte: Adaptado de Pisching et al. (2015b).

Conforme pode ser notado na Figura 26 cada nó na RHE tem vinculado a ele duas tabelas. A primeira, denominada **TOE** (Tabela das Operações do Equipamento), é uma tabela estática para armazenar informações relativas às capacidades do equipamento, ou seja, as operações que cada equipamento da hierarquia é capaz de processar diante do contexto produtivo que ele se encontra. A **TOE** possui duas colunas de dados, sendo elas (1) “*Operações_disponíveis*” – para manter as operações que um equipamento específico ou os seus descendentes na **RHE** é capaz

³⁹ A notação utilizada para os nomes dos nós da **RHE** está em “Times New Roman, itálico e entre aspas duplas”.

de processar – e (2) “*EID*” – refere-se a identificação do equipamento para processar a operação. A segunda tabela, denominada **TLE** (Tabela para Localização de Equipamento), é dinâmica e permite armazenar informações (referências) de equipamentos capazes de processar uma dada operação, podendo estar associada a qualquer nó da **RHE**. Os dados da **TLE** estão organizados em duas colunas: (1) “*Operação*” – contém o tipo de operação que pode ser processada por um ou mais equipamentos da **RHE**; (2) “*EID*” – refere-se ao **EID** do equipamento capaz de processar a operação. Essas tabelas possuem os dados para descoberta de equipamentos por meio de um mecanismo de busca similar ao DNS. As informações dinâmicas da **TLE** são utilizadas para determinar o equipamento para processar a operação, i.e., se um equipamento não for encontrado no elemento corrente, então uma pesquisa é executada no elemento que está imediatamente acima do nó corrente da hierarquia (também chamado de nó pai), com sucessivas buscas até encontrar um equipamento capacitado e disponível. Se a busca alcançar o topo da hierarquia e nenhum equipamento for encontrado, o sistema (de busca de equipamento) deve retornar uma mensagem de erro e o produto em processo de produção deve ser retirado de seu fluxo normal.

Figura 26 – As tabelas **TOE** e **TLE** utilizadas para a descoberta de equipamento para processar operações

Fonte: adaptado de Pisching et al. (2015b)

4.3 CONTROLE DAS OPERAÇÕES REQUISITADAS PELO PRODUTO

O controle das operações requisitadas pelos produtos (CORPP) durante os processos de manufatura é orientado por meio dos valores apresentados no exemplo

da Tabela 3. Cada produto necessita da tabela CORPP para orientar a sua produção. Essa tabela é organizada em 5 colunas que determinam o tipo de informação, enquanto que as linhas correspondem aos dados para controle das operações exigidas pelo produto. Cada uma das colunas é descrita a seguir:

- PID – Contém o **PID** do produto (identificação única do produto).
- Operação⁴⁰ – Corresponde à lista de operações exigidas pelo produto. A operação é a referência para determinar o equipamento para processá-la.
- Ordem – Determina a ordem com que cada operação deve ser processada.
- Situação – Corresponde a “Situação” (*status*) atual de cada operação. Os valores possíveis para esse campo são “Aberta” (operação a ser processada), “Concluída” (operação concluída); “Iniciada” (produto encaminhado para o processamento no equipamento definido); “Cancelada” (operação que não é processada por algum motivo, por exemplo, no caso de uma situação imprevista ou de solicitação de cancelamento do pedido por parte do consumidor ou sistema). Após o processamento de uma operação no produto a “Situação” correspondente deve ser atualizada para “Concluída” pelo componente **AOP** do serviço **WS_GOM**;
- EID – É utilizado para armazenar o **EID** do equipamento que processou a operação.

Tabela 3 – Um exemplo do conteúdo do CORPP.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto.X	Operação_A	1	Concluída	EM_1
	Operação_B	2	Iniciada	
Produto.Y	Operação_A	1	Aberta	
	Operação_D	2	Aberta	

⁴⁰ Neste trabalho a Operação é considerada uma operação macro sem detalhes de sua granularidade, isto é, uma peça pode exigir de um mesmo torno um conjunto de operações, tais como: broquear, perfilar, facear e rosquear. Assim, cada operação é tratada isoladamente conforme a sequência definida. No entanto, o conjunto de micro operações podem ser considerados para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

4.4 INTERATIVIDADE ENTRE OS COMPONENTES DA ARQUITETURA

Nesta seção são descritos os detalhes envolvidos na interatividade entre os componentes da arquitetura para suportar a troca de informações entre produtos e equipamentos necessárias para a descoberta de equipamentos.

A Figura 27 apresenta um exemplo para mostrar o fluxo do produto e os principais componentes necessários para a interação entre equipamento e produto para definir o encaminhamento de produtos durante processos de manufatura. O exemplo é composto por 3 esteiras que levam o produto até uma das máquinas M1, M2, M3 ou Mn conforme a verificação do produto em um ponto de verificação (**PV**). Após o processamento do produto em uma das máquinas ele passa por um ponto de atualização (**PA**) para registrar a operação realizada e também o equipamento que realizou o processamento. Os **PVs** são fundamentais para a definição do encaminhamento do produto conforme suas necessidades, ou seja, é o momento em que o produto é avaliado antes mesmo de ser submetido ao processamento de uma operação, o que dá ao processo a flexibilidade e a tomada de decisão em tempo de manufatura, possibilitando a produção sob demanda e personalizada. Sem os **PVs** os produtos são submetidos aos processos básicos pré-programados do sistema de manufatura. Por outro lado, por meio dos **PAs** se faz o registro das operações realizadas, auxiliando no processo da definição da operação seguinte. Assim sendo, a combinação de **PV** e **PA** são importantes para o sistema de descoberta e equipamentos e para determinar a próxima operação a ser processada em um dado produto.

4.4.1 Procedimento para processar uma operação

Para que um produto possa ser avaliado é necessário que ele passe por um **PV** (Figura 27). No **PV** se dá o início da interação entre produto e equipamento, onde um **Sensor** faz a leitura do **PID** do mesmo. Caso não seja encontrado um **PID**, o produto é processado de acordo com as instruções programadas no sistema legado mantendo as operações previstas originalmente do processo de produção. Caso contrário, o **PID** do produto é processado de acordo com as suas exigências registradas em sua tabela CORPP na base de dados **EV**. Para isso o **PID** é usado para obter a próxima operação e determinar o equipamento para processá-la. Este processo é mostrado na Figura 28 e explicado a seguir.

- Fluxo 1 – O **PID** é lido por um **Sensor** localizado em um **PV**.

Figura 27 – Exemplo de um esquema para representar os PVs e PAs.

Fonte: O autor.

- Fluxo 2 – O **PID** é enviado ao **Dispositivo de Controle (DC)**.
- Fluxo 3 – O **DC** recebe o **PID** e o envia ao **DGOM**.
- Fluxo 4 – O **DGOM** recebe o **PID** e o encapsula juntamente com o **EID** a uma mensagem de requisição que é enviada ao componente **CPO** do serviço **WS_GOM** via o canal de comunicação. O **WS_GOM** recebe a mensagem de requisição e faz a requisição ao componente **CPO** para determinar o encaminhamento do produto, i.e., encontrar o equipamento para processar a operação.
- Fluxo 5 – O componente **CPO** abstrai o **PID** da mensagem de requisição e requisita a próxima operação ao componente **PPO**.
- Fluxo 6 – Com base na mensagem recebida do **CPO** o **PPO** executa uma pesquisa à base de dados **EV** a fim de encontrar a próxima operação a ser processada, ou seja, a primeira ocorrência da tabela CORPP cujo valor da “*Situação*” seja igual a “*Aberta*”. Essa operação é realizada por meio dos fluxos “a” e “b” e utiliza o **PID** como chave primária para encontrar a próxima operação. A base de dados retorna o resultado da busca ao componente **PPO**. O componente **PPO** recebe o valor e então prepara uma mensagem de resposta com a próxima

operação a ser processada. A mensagem é retornada ao componente **CPO**.

Figura 28 – As interações entre os componentes da arquitetura para a descoberta de equipamento para processar operações.

Fonte: O autor.

- Fluxo 7 – O componente **CPO** requisita ao componente **SLE** o equipamento capaz de executar o processamento da operação exigida. Para isso, o **CPO** cria uma mensagem de requisição com os parâmetros **EID** e **Operação**. A mensagem de requisição é então enviada ao componente **SLE**. A seguir, o componente **SLE** interage com a base de

dados **RHE** por meio dos fluxos “c” e “d” para requisitar as tabelas **TOE** e **TLE** do equipamento corrente usando o parâmetro **EID** como referência de busca. Nas tabelas requisitadas, o **SLE** procura um equipamento para processar a operação. Caso um equipamento não seja encontrado na primeira ocorrência, a busca é executada novamente de forma recursiva no respectivo nó pai da hierarquia até que seja encontrado um equipamento. Os detalhes das operações lógicas do componente **SLE** para determinar e encaminhar o produto a um equipamento habilitado são explicados na subseção 4.4.2.

- Fluxo 8 – O componente **SLE** cria uma mensagem de resposta contendo os seguintes dados: **PID**, **EID-Destino** e **Operação**. A mensagem de resposta é devolvida ao componente **CPO**.
- Fluxo 9 – Com base nos dados recebidos do componente **SLE**, o **CPO** requisita a configuração do equipamento ao componente **CE** que recebe as instruções e as usa para preparar as devidas configurações do equipamento de destino.
- Fluxo 10 – O componente **CE** retorna uma mensagem contendo as configuração do equipamento ao componente **CPO**, i.e., as configurações do **DC** para processar a operação.
- Fluxo 11 – O componente **CPO** se comunica com o **SDDC** para submeter as configurações para executar a operação. O **CPO** também solicita a atualização da “*Situação*” da operação do produto para “*Iniciada*” na base de dados **EV** (pelos fluxos “e” e “f”), indicando que o equipamento foi definido e que o produto está sendo enviado para o mesmo.
- Fluxo 12 – O componente **SDDC** recebe as configuração do equipamento e as envia ao componente **DC**.
- Fluxo 13 – O **DC** aciona os dispositivos **Atuadores** conforme as configurações estabelecidas para iniciar o processamento do produto.
- Fluxo 14 – O produto é encaminhado para o equipamento para processar o operação requisitada por ele.

A Figura 29 apresenta um fluxograma das operações descritas nesta subseção de acordo com o conteúdo exposto na Figura 28.

Figura 29 – Fluxograma pré-operação – fluxo para determinar o encaminhamento do produto em processo de manufatura.

C* - Segue para o fluxograma apresentado na Figura 30.

D* - Continuação do fluxograma apresentado na Figura 30.

Fonte: O autor.

4.4.2 Procedimento para a descoberta de equipamentos

O componente **SLE** executa um procedimento específico para localizar o equipamento apropriado para processar a operação. Isto é realizado por meio de buscas na estrutura hierárquica de equipamentos na base de dados **RHE**. O fluxograma deste procedimento é apresentado na Figura 30 e detalhado a seguir.

Etapa 1 – Verificação na TOE – O **SLE** faz uma pesquisa na **TOE** do equipamento corrente. O propósito da busca é verificar se o equipamento corrente é capacitado e disponível para processar a operação exigida. Para isso são necessárias duas verificações com dois resultados possíveis:

– Primeira Verificação

Capacidade: O equipamento é capacitado para processar a Operação?

Resultados possíveis: (a) Afirmativo – Realiza a “**Segunda Verificação**”. (b) Negativo – Segue para a “**Etapa 2**”.

– Segunda Verificação

Disponibilidade: Verifica se o equipamento está disponível para processar a operação (livre ou ocupado), e.g., o equipamento corrente está danificado, logo, deixa de estar disponível. Essa verificação acontece pela interação com a base de dados **EV** que tem atualizado o estado das entidades físicas no mundo virtual.

Resultados possíveis e ações: (a) Afirmativo – O componente **SLE** prepara a mensagem de resposta com o PID, EID e a Operação. A mensagem é retornada ao componente **CPO**. (b) Negativo – Segue para a “**Etapa 2**”.

Etapa 2 – Verificação na TLE – O componente **SLE** requisita a **TLE** do equipamento corrente de onde se obtém uma lista de equipamentos capacitados a processar a operação (fluxo “c” da Figura 28). A **RHE** retorna a lista requisitada ao **SLE** (fluxo “d” da Figura 28). Com base nessa lista o **SLE** executa as seguintes verificações:

– Primeira Verificação – A lista está vazia?

Resultados possíveis e ações: (a) Afirmativo – O componente **SLE** faz uma nova pesquisa no respectivo nó pai da hierarquia na **RHE**. A seguir o processo de verificação é retomado na “**Etapa**

1". (b) Negativo – O **SLE** executa a próxima verificação (“**Segunda Verificação**” da “**Etapa 2**”).

Figura 30 – Fluxograma das verificações na TOE e na TLE.

*C** - Sequência do fluxograma apresentado na Figura 29.

*D** - Retorna para o fluxograma apresentado na Figura 29.

Fonte: O autor.

– **Segunda Verificação** – Procura um equipamento disponível

Cada um dos elementos da lista é verificado a fim de conhecer a disponibilidade (o que é realizado pelos fluxos “g” e “h” da Figura 28 usando a base de dados **EV** que tem o estado atualizado das instalações físicas). Esta iteração é executada até que um equipamento disponível seja encontrado ou até que o final da lista seja alcançado.

Resultados possíveis e ações: (a) Um equipamento disponível foi encontrado – O **SLE** prepara uma mensagem com **PID**, **EID** e a **Operação** e envia ao componente **CPO** (fluxo 8 da Figura 28). Quando um equipamento é descoberto e selecionado, o sistema deve notificar e armazenar a informação do equipamento nas **TLEs** dos equipamentos pesquisados nos nós subjacentes da hierarquia. Desta forma, o equipamento localizado se torna conhecido em outros nós da estrutura hierárquica, reduzindo o número de iterações em futuras buscas. (b) Fim da lista e um equipamento disponível não foi encontrado – Uma nova busca é executada pelo **SLE** para obter o respectivo nó pai do equipamento corrente na hierarquia. Se o topo da hierarquia é alcançado e um equipamento capacitado a processar a operação não tenha sido encontrado, então é disparado um evento e o produto deve ser enviado para um *buffer* (repositório), liberando o fluxo e o equipamento corrente para tratar outro produto.

4.4.3 Procedimento para atualizar a Situação do produto processado

Após o processamento da operação em um produto é necessário atualizar a sua “Situação”. Essa tarefa é realizada em um ponto de atualização (PA), onde o **PID** do produto é detectado e utilizado para notificar o componente responsável por iniciar essa atualização. O fluxo do procedimento de atualização é representado na Figura 31 e a seguir são discriminados cada um dos fluxos.

- Fluxo 1 – O **PID** do produto é lido por um sensor localizado em um **PA** (Ponto de Atualização).
- Fluxo 2 – O **PID** é enviado ao componente **DC**.
- Fluxo 3 – O **DC** envia o **PID** ao componente **DGOM**.
- Fluxo 4 – O **DGOM** prepara uma mensagem de requisição contendo o **PID**, o **EID** e a “Situação” da **Operação**. A requisição é enviada ao componente **AOP** do serviço **WS_GOM**.

Figura 31 – Fluxo para atualizar a “Situação” da operação processada no produto.

Fonte: O autor.

- Fluxo 5 – O **AOP** recebe a requisição e atualiza a “Situação” da operação na base de dados **EV**. O componente **AOP** requisita ao **EV** (fluxos “a” e “b” da Figura 31) a atualização da “Situação” da última operação processada no produto, alterando o valor que era “iniciado” para “concluído”. O componente **AOP** prepara as instruções para liberar o produto do **PA** e envia ao componente **SDDC**.

- Fluxo 6 – O **SDDC** passa as instruções ao **DC**.
- Fluxo 7 – O **DC** aciona os atuadores para liberar o produto de acordo com as instruções recebidas.
- Fluxo 8 – Os atuadores processam a operação sobre o produto corrente.

O fluxograma exposto na Figura 32 representa os passos envolvidos neste procedimento.

Figura 32 – Fluxograma pós-operação - fluxo para atualizar a “*Situação*” da operação processada no produto.

Fonte: O autor.

4.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

A arquitetura descrita neste capítulo segue o Modelo de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0 (RAMI 4.0). Dentre os modelos de arquiteturas de referências encontradas nas pesquisas, o RAMI 4.0 apresentou os elementos

essenciais para o presente trabalho, por isso, baseada na sua estrutura, foram definidos os componentes necessários para atender os requisitos, isto é, os componentes que viabilizam o funcionamento de um mecanismo de busca de equipamentos para processar operações conforme as necessidades do produto e, que é essencial para que a fábrica seja gerida de forma mais autônoma.

No cenário da Indústria 4.0, onde muitos aspectos em torno da pesquisa e desenvolvimento ainda são expectativas, inclusive para o RAMI 4.0, a arquitetura apresentada neste capítulo contribui para o desenvolvimento de sistemas para resolver equipamentos de forma autônoma por meio do mecanismo de descoberta similar ao DNS (com a diferença de que o DNS resolve endereços da Internet, enquanto este resolve o equipamento para processar uma operação), onde os equipamentos são organizados hierarquicamente na **RHE** para facilitar as buscas conforme as exigências dos produtos em fase de manufatura. Para auxiliar neste processo, considerou-se duas tabelas de controle, a **TOE** (Tabela das Operações do Equipamento) e **TLE** (Tabela para Localização de Equipamentos). Estas tabelas oferecem meios para encontrar as capacidades de um equipamento em particular e também de equipamentos disponíveis em uma rede de serviços colaborativos, possibilitando que um produto possa ser encaminhado à uma máquina conforme a capacidade e disponibilidade seguindo as necessidades do produto. A arquitetura apresenta ainda os componentes físicos para avaliar e atualizar a situação de produção dos produtos, sendo eles o ponto de verificação (**PV**) e o ponto de atualização (**PA**).

A arquitetura proposta e seus componentes é uma solução concreta para a implementação de sistemas de produção sob demanda e personalizados no contexto da Indústria 4.0.

Destaca-se ainda que as bases **EV** e **RHE** são aqui mantidas em servidores de dados em uma rede de comunicação. No entanto, há de se considerar a possibilidade de os produtos carregarem a suas informações em uma etiqueta RFID e de a **RHE** ser hospedada no próprio dispositivo de controle, haja vista que na I4.0 eles são considerados CPSs e por isso têm a capacidade de processar e armazenar dados. Diante da necessidade da digitalização das “coisas” (recursos de manufatura), caberá ainda o desenvolvimento de procedimentos para isso, ou seja, definição de métodos que orientem os passos para digitalizar os produtos e também os equipamentos.

A arquitetura e seus componentes aqui propostos foram verificados e validados por meio de modelos desenvolvidos com PFS/RdP, considerando as funcionalidades dos componentes e a interação entre estes. Com o PFS/RdP são gerados os modelos que após o processo de verificação/validação, pode-se se derivar uma especificação técnica do sistema (na forma de modelos em RdP devidamente interpretados). A especificação do sistema por meio de uma técnica formal tal como a RdP permite a sua certificação. Esta etapa é desenvolvida no próximo capítulo.

5 MODELAGEM CONCEITUAL E FUNCIONAL DOS PROCESSOS

Neste capítulo é apresentada a modelagem conceitual e funcional dos processos para verificar e validar os componentes da arquitetura proposta e suas interações. A modelagem é desenvolvida por meio da técnica PFS/RdP (*Production Flow Schema/Rede de Petri*). Inicialmente é elaborada a modelagem conceitual das interações dos componentes por meio de PFS. A partir de refinamentos do modelo em PFS se chega a modelos em RdP que permitem a verificação e validação dos comportamentos funcionais da arquitetura.

5.1 MODELAGEM CONCEITUAL DOS PROCESSOS

A Figura 33 sintetiza a abstração dos principais componentes da arquitetura para a descoberta de equipamento para processar operações conforme as necessidades do produto. As interações entre as camadas são representadas por arcos orientados sem a necessidade do uso de elementos distribuidores, uma vez que em cada nível se tem diferentes processos que dependem uns dos outros. Com base no PFS apresentado na Figura 33, cada atividade é refinada sucessivamente de modo que os detalhes das atividades e as interações dos componentes da arquitetura possam ser claramente descritos.

Figura 33 – Modelo em PFS dos componentes da arquitetura e suas interações.

Fonte: O autor.

O refinamento da atividade [Mundo Físico] é apresentado na Figura 34. A verificação e atualização do produto são realizadas neste nível. O PFS da Figura 34 retrata o fluxo principal do produto, onde ele deve ser avaliado em um [Ponto de Verificação] do equipamento para identificar a operação solicitada e, a seguir, determinar para qual equipamento ele será encaminhado conforme as suas especificidades, seguido da atualização da “*Situação*” por meio da atividade [Ponto de Atualização]. O exemplo para mostrar o fluxo do produto conforme o PFS da Figura 34 é apresentado na Figura 35(o mesmo já apresentado na Figura 27).

Figura 34 – Refinamento da atividade [Mundo Físico] (a partir da Figura 33).

Fonte: O autor.

Figura 35 – Exemplo de um esquema representado pelo o PFS da Figura 34.

Fonte: O autor.

Na Figura 36, é apresentado o refinamento da atividade [Ponto de Verificação]. Na atividade [Ponto de Verificação] o **PID** é detectado e lido pela atividade [Sensor] e depois enviado à atividade [Configura Operação] (fluxos 1 e 2 da Figura 28). Por outro lado, a atividade [Atuador] recebe as configurações referente ao processo que deve ser executado (fluxos 13 e 14 da Figura 28). Conforme as configurações recebidas, o produto é enviado à atividade [Processa Operação] ou à atividade [Fim do processo] (Figura 34). No primeiro caso o produto é processado levando em conta a operação exigida e a seguir ele deve passar por um [Ponto de Atualização] para atualizar a “Situação” da operação executada no produto. Após a atualização o produto é enviado a um [Buffer], reiniciando o ciclo até que a atividade [Fim do Processo] seja alcançada. A atividade [Configura Operação] representa a interação com o mundo informacional por meio das atividades [DGOM] e [SDDC] da atividade [Integração] (Figura 37). Observa-se que a atividade [Configura Operação] interage com a atividade [Ponto de Verificação] por meio dos arcos de entrada e saída representando a interação entre elas. No arco de entrada ocorre a requisição à atividade [Configura Operação] (isto é, a identificação da operação solicitada e o equipamento para processá-la). Esse procedimento é executado por *software* no mundo virtual usando as bases de dados que armazenam a representação do mundo físico. O arco de saída da atividade [Configura Operação] contém os parâmetros para ativar os dispositivos de controles físicos de modo que os produtos possam ser enviados para o processamento no equipamento apropriado.

Figura 36 – Refinamento da atividade [Ponto de Verificação] (a partir da Figura 34).

Fonte: o autor

A Figura 37 mostra o refinamento da atividade [Configura Operação], onde são mostrados os detalhes relacionados à leitura do **PID**. Essa interação acontece por meio da atividade [DGOM]. Por outro lado, a atividade [SDDC] recebe os dados das camadas superiores necessários para configurar o **DC (Dispositivo de Controle)** e assim acionar os atuadores para executar as operações no mundo físico conforme a definição das configurações definidas por *software* nas camadas superiores da arquitetura.

Figura 37 – Refinamento da atividade [Configuração Operação] (a partir da Figura 36).

Fonte: O autor.

A Figura 38 mostra o refinamento da atividade [DGOM] (referente aos fluxos 3 e 4 da Figura 28). Esta atividade recebe o **PID** enviado pela atividade [Configura Operação] que é utilizada para criar a requisição de pesquisa da próxima operação exigida pelo produto. Esta requisição contém os parâmetros essenciais: (a) o **PID** e (b) o **EID** (que é a referência do equipamento corrente onde o produto se encontra fisicamente). O pedido criado deve ser enviado à atividade [CPO].

Figura 38 – Refinamento da atividade [DGOM] (a partir da Figura 37).

Fonte: O autor.

A atividade [CPO] é detalhada na Figura 39. Esta atividade representa o fluxo 5 do componente **WS_GOM** da Figura 28. Ela possui uma interface de entrada para a atividade [Recebe o pedido] e uma saída representada pela atividade [Envia as configurações ao SDDC] – utilizada para retornar os parâmetros de configuração do equipamento para processar a operação. Na Figura 39 também é mostrado o refinamento da atividade [Processa o pedido] em seis sub-atividades relacionadas a troca de mensagens entre as atividades [PPO], [SLE] e [CE] (referente os fluxos 6, 7 e 8 da Figura 28). Após o processamento do pedido devem ser executadas duas ações simultaneamente: (1) o retorno das variáveis de configuração para a atividade [SDDC] por meio da atividade [CPO], e (2) a atualização do campo “Situação” da **Operação** para “Iniciada” e a definição do **EID** referente ao equipamento para processar a operação. A ação (2) é realizada na [EV] que é a base de dados para armazenar as informações sobre as entidades digitalizadas (por exemplo, os detalhes das operações do produto durante as etapas de manufatura).

Figura 39 – Refinamento da atividade [CPO] e o respectivo refinamento da atividade [Processa o pedido] e suas interações com [PPO], [SLE] e [CE] (a partir da Figura 38).

Fonte: o autor

O refinamento da atividade [PPO] é mostrado na Figura 40. Esta atividade (que representa o fluxo 6 da Figura 28) contém um arco de entrada e um de saída. A entrada corresponde ao pedido da operação a ser processada e a

saída se refere a resposta à atividade [Retorna a operação encontrada]. A atividade [Pesquisa a próxima operação] executa uma procura na base de dados **EV** que é representada pela interação com a atividade [EV]. O resultado dessa busca é verificado pela atividade [Verifica a operação encontrada], que pode apresentar dois resultados possíveis: (1) uma **Operação** a ser processada e que é retornada pela atividade [PPO], ou (2) um valor “NULL” para a **Operação**, indicando que nenhuma operação a ser processada foi encontrada pela busca corrente. Caso ocorra a segunda situação é necessário definir uma operação temporária para liberar o produto da atividade [Ponto de Verificação], reposicionando o produto em um [Buffer] (Figura 34). Esta situação é representada pelo detalhamento da atividade [Retirar produto da produção]. Para isso um novo registro na tabela de controle de operações requisitadas pelo produto (CORPP) deve ser criado. Este registro tem os seguintes valores:

- **Operation** = “Retirar produto”
- **Situação** = “Aberta”

Figura 40 – Refinamento da atividade [PPO] (a partir da Figura 39).

Fonte: O autor.

O armazenamento do registro definido é representado pela interação da atividade [Grava o registro na base dados EV] com a atividade [EV]. Neste caso, a nova operação contém as coordenadas para retirar o produto do processo de manufatura corrente.

A próxima interação da atividade [CPO] é a requisição de um equipamento (EQP) capaz de processar a operação. A atividade que trata dessa operação é a [SLE] que representa o fluxo 7 da Figura 28. O refinamento da atividade [SLE] é ilustrado na Figura 41. Para se obter uma resposta é executada uma pesquisa na RHE, representada pela interação da atividade [Obtém dados do equipamento usando o EID] com a atividade [RHE], respeitando o procedimento mostrado no fluxograma da Figura 30. Adicionalmente, a atividade [Realiza busca na TLE] é desmembrada para demonstrar o fluxo iterativo para descobrir um equipamento capaz de processar a operação (Figura 42). Caso o resultado desta pesquisa seja diferente de “NULL” (**EID** ≠ “NULL”) e o equipamento esteja disponível, o fluxo segue para a atividade [Notifica o EID encontrado] (Figura 41). Caso contrário o fluxo segue para a atividade [Pesquisa o próximo EQP na RHE]. Esta iteração pode ocorrer por *n* vezes até que um equipamento seja encontrado ou o topo da hierarquia seja alcançado. Se um equipamento for descoberto, então o seu respectivo **EID** é retornado para continuar o fluxo funcional da atividade [SLE] até que o controle seja devolvido para a atividade [Recebe o equipamento] da Figura 39.

Baseada na identificação da operação e o equipamento para processá-la, a atividade [CPO] interage com a atividade [CE] para configurar as variáveis de controle e as instruções necessárias para que o equipamento possa executar o processo desejado (fluxos 9 e 10 da Figura 28). A Figura 43 apresenta os detalhes da atividade [CE], onde é avaliado se o equipamento para processar a operação foi descoberto, isto é “**EID** ≠ **NULL**?”. Caso o resultado seja verdadeiro, as variáveis e instruções de controle do equipamento são configuradas conforme a operação exigida. Caso contrário, uma operação é definida para retirar o produto do processo de manufatura. As configurações são então devolvidas à atividade [CPO] que as envia à atividade [SDDC] que representa a camada de ‘Integração’, conforme mostra a Figura 44 (representado pelos fluxos 11 e 12 da Figura 28). Finalmente, as configurações são submetidas à atividade [DC recebe configurações de

controle] (ilustrada na Figura 37). Esta operação leva ao fim da atividade [Configura Operação], retornando o controle para a atividade [Ponto de Verificação] para acionar os mecanismos e proceder com o processamento da operação representado pelas atividades do [Mundo Físico].

Figura 41 – Refinamento da atividade [SLE] (a partir da Figura 39).

Fonte: O autor.

Figura 42 – Refinamento da atividade [Realiza busca na TLE] que representa o mecanismo de busca na TLE (a partir da Figura 41).

Fonte: O autor.

Figura 43 – Refinamento da atividade [CE] (a partir da Figura 39).

Fonte: O autor.

Figura 44 – Refinamento da atividade [SDDC] (a partir da Figura 37).

Fonte: O autor.

Assim como a modelagem realizada em PFS para a atividade [Ponto de Verificação], referente aos sucessivos refinamentos da atividade [Mundo Físico], originados a partir da Figura 34, a atividade [Ponto de Atualização] é modelada para verificar as operações envolvidas no procedimento para atualizar os dados das operações processadas nos produtos pelos equipamentos do processo de manufatura. A modelagem, no entanto, é realizada com base nos fluxos apresentados na Figura 31.

A Figura 45 apresenta o detalhamento da atividade [Ponto de Atualização], retratando o momento no qual um sensor lê o **PID** após um equipamento processar a operação. O **PID** é enviado para a atividade [Atualiza Operação] que os recebe e envia à atividade [DGOM] na atividade [Integração] (conforme mostrado na Figura 46). Logo após o tratamento da

atualização da operação pelas atividades das camadas mais altas (mundo virtual), a atividade [SDDC] retorna uma instrução para liberar o produto à atividade [Integração]. Por fim a atividade [Atualiza Operação] interage com a atividade [Atuador] passando a instrução para liberar o produto que é encaminhado para um [Buffer], onde pode ser submetido novamente a uma avaliação em uma atividade [Ponto de Verificação] (Figura 34) reiniciando o procedimento de verificação.

Figura 45 – Refinamento da atividade [Ponto de Atualização] (a partir da Figura 34).

Fonte: O autor.

Figura 46 – Refinamento da atividade [Atualiza Operação] (a partir da Figura 45).

Fonte: O autor.

O refinamento da atividade [DGOM], que corresponde à requisição da atualização da operação é apresentado na Figura 47. A atividade [DGOM] recebe o **PID** e prepara uma requisição contendo o **PID** e o **EID** (do equipamento corrente), para então enviá-la à atividade [AOP]. Na arquitetura o **AOP** (Atualiza Operação

Processada) é o componente do serviço **WS_GOM** encarregado pela atualização da situação pós-processamento da operação.

A Figura 48 apresenta o refinamento da atividade [AOP]. A [AOP] recebe um pedido proveniente da atividade [DGOM], cabendo a ela processar a requisição que se trata do procedimento para atualizar a “Situação” da operação do produto processado, i.e., a “Situação” da operação que havia sido definida em “Iniciada” é atualizada para “Concluída”. Nesse momento também é armazenado o **EID** do equipamento de modo que é possível, caso necessário, conhecer qual equipamento processou uma determinada operação.

Figura 47 – Refinamento da atividade [DGOM] em relação a atividade [AOP] (a partir da Figura 46).

Fonte: O autor.

Figura 48 – Refinamento da atividade [AOP] (a partir da Figura 47).

Fonte: O autor.

5.2 MODELAGEM FUNCIONAL USANDO REDE DE PETRI

Os modelos em PFS são convertidos em modelos em rede de Petri (RdP), cujo propósito é verificar e validar seus comportamentos, de modo a garantir a especificação das funcionalidades dos componentes do sistema. Pela verificação é possível avaliar a semântica do modelo e assim determinar se satisfazem as condições impostas para a operação do sistema, permitindo a avaliação de aspectos tais como *deadlock*, comportamentos dinâmicos, existência de estados desejados e indesejados, e outras propriedades relacionados aos modelos em RdP e ao comportamento de sistema. A validação, realizada por meio da simulação, torna possível assegurar que as funcionalidades do sistema foram projetadas corretamente. Os modelos apresentados nesse trabalho são simulados com a ferramenta **HPSim**⁴¹

O modelo em RdP da Figura 49 são derivados dos modelos em PFS da Figura 34 até a Figura 39, mostrando o [Mundo Físico] e as respectivas interações com o [Ponto de Verificação] e [Configura Operação]. A Figura 49 ainda apresenta a fusão dos modelos em RdP para permitir a troca de dados entre [Configura Operação], [DGOM] e [SDDC] com [CPO], i.e., possibilitando a simulação das transições entre componentes de diferentes camadas.

Conforme a Figura 49, a operação do sistema começa a partir da atividade [Mundo Físico] pertencente à camada '**Ativo Técnico**' da arquitetura. Quando um produto identificado chega ao [Ponto de Verificação] começa o processo para descoberta do equipamento para processar a operação. Pelo fato de as camadas da arquitetura serem interdependentes, foram definidos lugares em RdP para "aguardar" enquanto os componentes das demais camadas possam resolver o pedido (conforme pode ser observado nos lugares L6, L10 e L17 da Figura 49). A execução dos componentes de cada camada é retomada com a chegada (retorno) da resposta do componente requisitado. Vale destacar que as interações entre as camadas acontecem no modo pedido/resposta, i.e., uma camada envia à outra um pedido e deve aguardar até que receba uma resposta para dar continuidade em seu procedimento funcional. As interações entre os componentes da Figura 49 são executados por meio das seguintes transições:

⁴¹ <http://www.winpesim.de/>

Figura 49 – Modelagem em RdP das atividades [Mundo Físico], [Ponto de Verificação], [Configura Operação], [DGOM], [SDDC] e [CPO] (da Figura 34 a Figura 39).

Fonte: O autor.

- MF_3 para PV_1 – Esta transição corresponde ao início da verificação de uma operação exigida pelo produto enquanto aguarda a resposta no local L6.
- PV_2 para MF_3 – A atividade [Ponto de Verificação] recebe as instruções de controle para rotear o produto para o equipamento que deve processar a operação requisitada conforme as configurações definidas no [Mundo Virtual].
- CO_3 e DG_1 – O **PID** é enviado à atividade [DGOM] e a atividade [Configura Operação] aguarda a resposta da atividade [SDDC].
- DG_3 e CPO_1 – A atividade [DGOM] solicita as configurações para processar a próxima operação à atividade [CPO] e o lugar L17 sinaliza a atividade [SDDC] para aguardar uma resposta da atividade [CPO]. A transição SNO_1 representa a atividade [Recebe o pedido] do modelo em PFS apresentado na Figura 39.
- CPO_4 e SDDC_1 – Trata-se da resposta proveniente da atividade [CPO], i.e. as configurações do equipamento. A transição SNO_4 representa a atividade [Envia as configurações ao SDDC] mostrada na Figura 39.
- SDDC_3 e CO_4 – A atividade [SDDC] retorna a resposta à atividade [Configura Operação] por meio das transições SDDC_3 e CO_4. A resposta é a configuração do equipamento para processar a operação.

Os lugares L17 e L21 ativam as transições CPO_4 e SDDC_1 (Figura 49) representando o tempo de espera da atividade [CPO] enquanto seus componentes resolvem o equipamento para processar o produto. Com essa interação a atividade [SDDC] recebe as configurações e as envia ao **DC** na camada física (**‘Ativo Técnico’**) para acionar os controles necessários para encaminhar o produto ao equipamento destinado a processar a operação.

A Figura 50 mostra o modelo em RdP derivado dos modelos em PFS apresentados na Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 43. O refinamento da atividade [Processa o pedido] que foi originada no refinamento da atividade [CPO] (Figura 39), apresenta o fluxo que deve ser seguido para o processamento do pedido que é realizado pelas interações com as seguintes

atividades de forma sequencial: (i) [PPO] obtenção da operação a ser processada; (ii) [SLE] descoberta e seleção do equipamento para processar a operação; e (iii) [CE] configuração do equipamento.

Na Figura 50, as interações entre as atividades [Processa o pedido] e [PPO] representa uma operação do tipo pedido/resposta. Estas interações são realizadas pelas seguintes transições:

- PP_1 e PPO_1 – São as transições para realizar o pedido a partir da atividade [Processa o pedido], colocando o local L1 em espera enquanto a atividade [PPO] realiza a busca pela próxima operação.
- PPO_5 e PP_2 – São as transições que representam a resposta ao pedido originado na atividade [Processa o pedido]. A transição PP_2 é ativada pela combinação do lugar L1 com a ativação da transição PPO_5 representando a resposta à atividade [Processa o pedido].

Após encontrar a operação exigida pelo produto, a atividade [Processa o pedido] recebe o controle novamente e inicia a solicitação da busca de um equipamento capaz e disponível para processar a operação. Esta ação é realizada por meio da interação com a atividade [SLE]. As transições responsáveis pela operação pedido/resposta são listadas a seguir.

- PP_3 e SLE_1 – São as transições para realizar o pedido de um equipamento. O pedido é iniciado na transição PP_3 que é recebido pela transição SLE_1 enquanto a resposta (provinda da atividade [SLE]) é aguardada na atividade [Processa o pedido] no lugar L3.
- SLE_12 e PP_4 – São as transições que representam a resposta à atividade [Processa o pedido] a partir da atividade [SLE]. A transição SLE_12, que corresponde à resposta, quando ativada, juntamente com o lugar L3, dispara a transição PP_4 para dar sequência a atividade [Processa o pedido].

Figura 50 – Modelagem em RdP das interações entre a atividade [Processa o pedido] com as atividades [PPO], [SLE] e [CE] (Referente os modelos em PFS: Figura 39, Figura 40, Figura 41 e a Figura 43).

Fonte: O autor.

Por fim, a terceira atividade requisitada pela atividade [Processa o pedido] é a [CE] (Figura 50). A atividade [CE] é responsável pela configuração de um equipamento selecionado conforme a operação exigida pelo produto. A troca de informações entre essas atividades acontece por meio das seguintes transições:

- PP_5 e CE_1 – É o canal para enviar o pedido à atividade [CE] enquanto a atividade [Processa o pedido] aguarda a configuração do equipamento no lugar L5.
- CE_8 e PP_6 – Estas transições representam a resposta gerada pela atividade [CE] que é entregue à atividade [Processa o pedido], caracterizada pela fusão das transições CE_8 e PP_6.

É importante notar que após esta última interação da atividade [Processa o pedido], a atividade [CPO] tem todas as instruções para enviar ao **DC** via atividade [SDDC].

A Figura 52 apresenta o modelo em RdP das interações pedido/resposta referente à atividade [Ponto de Atualização]. Este modelo foi derivado dos modelos em PFS apresentados a partir da Figura 45 até a Figura 48. Este procedimento é similar ao procedimento da atividade [Ponto de verificação], exceto o fato de que o procedimento relacionado à atividade [AOP] é responsável por atualizar a informação a respeito da operação que foi executada por um determinado equipamento sobre um produto. As transições que representam as interações entre os componentes são as seguintes:

- AP_3 e DG1 – São as transições responsáveis por enviar/receber o pedido de atualização a partir da atividade [Atualiza Operação]. Enquanto as atividades [DGOM], [AOP] e [SDDC] executam seus procedimentos, a atividade [Atualiza Operação] fica em estado de espera no lugar L5.
- AP_4 e SDDC_3 – São as transições utilizadas para a resposta originada na atividade [AOP] que diz respeito à liberação do produto para o próximo processo.

Figura 52 –RdP da atividade [Ponto de Atualização] e as interações, por meio da fusão de redes, com [DGOM], [SDDC] e [AOP] (da Figura 45 a Figura 48).

Fonte: O autor.

- DG_3 e AOP_1 – Essas transições fazem a interface entre as atividades [DGOM] e [AOP], representando a solicitação da atualização da “Situação” do produto por meio do componente **DGOM** ao componente **AOP**. Enquanto [AOP] executa suas etapas, a atividade [DGOM] sinaliza a atividade [SDDC] para aguardar a confirmação da atualização e a liberação do produto.
- AOP_4 e SDDC_1 – Essas transições representam a resposta do componente **AOP** ao **SDDC**, de modo que a atividade [SDDC] continue seu processo e submeta uma resposta à atividade [Atualiza Operação] via transições SDDC_3 e AP_4.

5.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Nesse capítulo foi realizada a modelagem da arquitetura e processos envolvidos por meio da abordagem PFS/RdP em complemento às definições dos componentes e suas respectivas interações relatadas no capítulo 4. Ao mesmo tempo que a modelagem, por meio de uma técnica formal, permite conhecer os detalhes estruturais e funcionais de cada componente, é possível também verificar e validar

os seus comportamentos. Por meio dessa abordagem tem-se um meio sistematizado para identificar os elementos necessários para a implementação da arquitetura e garantir assim a sua efetividade.

Cada um dos modelos em RdP apresentados nesse capítulo representam os refinamentos derivados de modelos em PFS. Por meio da técnica PFS/RdP, o sistema modelado conceitualmente é refinado até se chegar às especificações detalhadas que resultam nos componentes da arquitetura com suas respectivas interações. Por meio da simulação das RdP foi possível observar os comportamentos dinâmicos das funcionalidades do sistema, e assim, constatar que os componentes e suas interações estão de acordo com as especificações definidas na modelagem conceitual, atendendo aos requisitos dos componentes que foram descritos no Capítulo 4 deste trabalho.

Com base na modelagem foram verificados os elementos que avaliam as necessidades dos produtos e a partir disso se determinam os equipamentos para processá-los em tempo de produção. Desta forma, nota-se que os procedimentos relacionados às atividades [Ponto de Verificação] e [Ponto de

Atualização] são determinantes para que haja a devida interação entre os mundos físico e virtual de modo que um equipamento seja descoberto para processar a operação exigida pelo produto. Assim sendo, é necessário que sejam estabelecidos os **PVs** e **PAs** para, respectivamente, determinar o equipamento para processar a operação e também para atualizar a “Situação” das operações realizadas.

No capítulo 6 é mostrado um exemplo de aplicação da arquitetura na realização do fluxo do produto de acordo com as operações necessárias para sua manufatura, assim como os elementos envolvidos na implementação da arquitetura.

6 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Neste capítulo é apresentado um exemplo de aplicação da arquitetura em um sistema produtivo. O cenário da aplicação é baseado em um sistema modular de produção (MPS – *Modular Production System*) do Laboratório de Sistemas de Automação do Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (PMRLSA-EPUSP). O referido MPS, originalmente, não implementa os conceitos envolvidos na Indústria 4.0. Portanto, para a realização da aplicação foram realizados arranjos necessários, que são detalhados na subseção 6.2.3, para que o sistema estivesse em conformidade com a arquitetura apresentada neste trabalho e com os preceitos da Indústria 4.0 e do RAMI 4.0.

6.1 MPS

O MPS utilizado neste exemplo foi adquirido da Festo, e é dividido em módulos que representam etapas distintas do sistema de produção, permitindo também a configuração de diferentes arranjos produtivos. Em uma configuração básica, os módulos são integrados formando uma linha de produção sequencial, originalmente programada para processar peças de acordo com a leitura feita por sensores presentes nos módulos, como por exemplo, sensor de cor, sensor de altura e sensor de posição. Os módulos contam também com atuadores que executam ações programadas conforme a leitura dos sensores. Para o controle de suas ações, cada módulo possui um CLP (Controlador Lógico Programável) da família CPX-CEC, também da Festo, passível de comunicação via protocolo de rede TCP/IP. Os módulos podem ser monitorados e controlados remotamente por meio do servidor OPC CODESYS⁴².

No presente exemplo são utilizados 3 módulos denominados Teste (*Testing*), Processamento (*Processing*) e Classificação (*Sorting*).

O módulo de Teste, mostrado na Figura 53, realiza a verificação nos produtos e determina a aprovação ou rejeição dos mesmos segundo critérios estabelecidos. Os testes nesse módulo podem ser realizados conforme a cor e também altura do produto.

⁴² O servidor OPC CODESYS é desenvolvido e comercializado pela empresa 3S-Smart Software Solutions (<https://www.codesys.com/>). A versão utilizada acompanha o MPS da Festo.

O módulo para Processamento de produtos, apresentado na Figura 54, tem recursos para simular um processo de usinagem. Um sensor elétrico identifica a presença do furo na peça, em seguida o módulo de furação atua sobre a mesma, emulando um processo de furação na vertical. Nesse módulo o transporte da peça ocorre pela ação de uma mesa rotativa.

Figura 53 – Módulo de Teste de produtos.

Fonte: Manuais técnicos do MPS fornecidos pela Festo.

Figura 54 – Módulo de Processamento de produtos.

Fonte: Manuais técnicos do MPS fornecidos pela Festo.

Na Figura 55 é mostrado o módulo de Classificação. Este módulo realiza o processo de triagem do produto por meio de uma esteira, 3 desviadores e 3 rampas. Há dois tipos de sensores, óptico e indutivo. Assim o produto é direcionado para uma das três rampas de acordo com suas características que podem ser estabelecidas na programação do controlador.

Figura 55 – Módulo de Classificação de produtos.

Fonte: Manuais técnicos do MPS fornecidos pela Festo.

6.2 IMPLEMENTAÇÃO

Para atender as especificações da arquitetura para a descoberta de equipamentos para processar operações conforme as exigências do produto são necessárias duas etapas distintas. A primeira está relacionada à identificação dos produtos e a definição da tabela CORPP (Controle de Operações Requisitadas pelo Produto). A segunda se refere à definição dos pontos de verificação (**PVs**) e de atualização (**PAs**), uma vez que na verificação é que se define o encaminhamento do produto, enquanto que na atualização se faz o registro dos processamentos executados no produto.

6.2.1 Implementação dos componentes

A Figura 56 apresenta um esquema para a configuração do MPS para atender os componentes da arquitetura. A implementação dos componentes físicos e lógicos da arquitetura é desenvolvida por meio de tecnologias utilizadas no desenvolvimento de sistemas de automação. Cada componente, conforme a camada em que se

encontra (RAMI 4.0), requer um tipo distinto de tecnologia, mas estes componentes interagem uns com outros para prover a solução integral de um sistema para Indústria 4.0. As tecnologias consideradas no exemplo são detalhadas nos próximos parágrafos desta subseção.

Figura 56 – Esquema da configuração dos componentes baseado em um MPS da Festo.

Fonte: O autor.

No âmbito do mundo físico, os pontos de verificação (**PVs**) e atualização (**PA**s) são implementados por meio de sensores RFID. Para fins demonstrativos e pelo fato de o MPS utilizado neste experimento não possuir tal dispositivo, os sensores RFID são adaptados aos módulos e controlados por Arduino⁴³, uma plataforma de prototipagem eletrônica de baixo custo. Essa tecnologia é adotada em função de suas características e também por permitir o controle de entradas e saídas de dados de dispositivos físicos. Desta forma, com o Arduino é possível fazer a leitura das etiquetas RFID, que é uma tarefa essencial na arquitetura proposta.

Os componentes da camada de '**Integração**' são implementados da seguinte forma. O componente **SDDC** é implementado por meio da tecnologia OPC-UA e um conjunto de ferramentas de desenvolvimento denominado *Unified Automation*⁴⁴ *Java SDK* (SDK – *Software Development Kit*). Por meio dessas tecnologias é possível o desenvolvimento da solução para integrar a camada '**Ativo Técnico**' às camadas '**Informação**', '**Funcional**' e '**Regra de Negócio**'. O componente **DGOM** é implementado por meio da linguagem de programação Java. A '**Comunicação**' é realizada por protocolos de comunicação da Internet (TCP/IP – *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*). Conforme mostra a Figura 56, tanto o **SDDC** quanto o **DGOM** são executados em computador pessoal (PC).

O serviço **WS_GOM** e seus componentes são implementados com a plataforma JEE⁴⁵ (*Java Enterprise Edition*), enquanto a implementação das bases de dados **EV** e **RHE** são desenvolvidas no sistema gerenciador de banco de dados *MySQL*⁴⁶. O **WS_GOM** e as bases de dados **EV** e **RHE** estão disponíveis em um servidor *Web* compatível com a plataforma JEE.

⁴³ Arduino – É uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em um conjunto de *hardware* e *software* caracterizado como *easy-to-use* (fácil de usar) (<https://www.arduino.cc/>).

⁴⁴ A *Unified Automation Company* (<https://www.unified-automation.com/company.html>) é uma empresa que oferece produtos e serviços no campo da comunicação padronizada na indústria de automação e outras. Os produtos e serviços são desenvolvidos com base na tecnologia OPC-UA, oferecendo um *framework* de desenvolvimento de *software* multiplataforma para permitir a integração vertical de provedores de aplicação, desde fabricantes de dispositivos embarcados até desenvolvedores de aplicativos empresariais. Dentre os recursos desenvolvidos pela empresa estão as ferramentas de desenvolvimento integrado (SDK – *Software Development Kit*) com suporte às principais plataformas de desenvolvimento de *software*: Java, C/C++, C# e .Net.

⁴⁵ A JEE (<http://www.oracle.com/technetwork/java/javasee/tech/index.html>) é uma plataforma de *software* para o desenvolvimento de aplicações distribuídas e aplicações *Web* baseada na linguagem de programação Java.

⁴⁶ O *MySQL* (<https://www.mysql.com/>) é um sistema gerenciador de banco de dados relacional (SGBD-R) que utiliza a linguagem de consultas estruturada (em Inglês SQL – *Structured Query Language*). O *MySQL* pode ser utilizado em *software* de grande porte com aplicações distribuídas e para *Web*, contando com recursos para a manipulação de grandes volumes de dados. Assim como todas as plataformas Java, o *MySQL* é um produto mantido e desenvolvido pela empresa Oracle (<https://www.oracle.com/index.html>).

Vale destacar que as tecnologias utilizadas neste exemplo não são exclusivas para a implementação da arquitetura. A mesma pode ser implementada com outras tecnologias desde que suportem os componentes requisitados por ela, entre elas: sensores e leituras RFID, comunicação com OPC-UA, implementação da SOA e Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD).

6.2.2 *Identificação dos produtos*

Os produtos a serem manufaturados devem receber um identificador único (**PID**) que permita o acompanhamento de sua produção. Para isso são utilizadas as etiquetas RFID (ou NFC). Por meio das etiquetas são realizadas as operações de leitura para determinar o encaminhamento do produto, possibilitando a execução das operações lógicas e físicas previstas na arquitetura. Cada produto deve ser registrado na base de dados **EV** (Entidade Virtual) e disponibilizados para o controle das operações na CORPP. A digitalização do equipamento é realizada a partir da sua disponibilização física no sistema produtivo.

Com solicitação da manufatura do produto (realizada, por exemplo, pelo consumidor via aplicativo), o produto digital é habilitado para produção, e sua CORPP com as operações necessárias são iniciadas com a “Situação” no estado “Aberta”.

6.2.3 *Organização e distribuição dos elementos físicos do sistema de produção*

O sistema de produção deve ser mapeado de forma a satisfazer os componentes da camada ‘**Ativo Técnico**’ que fazem parte do mundo físico. Nesse sentido cada equipamento deve fazer parte da **RHE**. Entre as configurações relevantes para o funcionamento da arquitetura estão as definições de *Buffers* (BF), Início do Processo de Manufatura (IPM), Fim do Processo de Manufatura (FPM), Operação (OP), Ponto de Verificação (PV) e Ponto de Atualização (PA). Para o presente caso, cada um dos módulos apresentados anteriormente (Figura 53, Figura 54 e Figura 55) foram configurados para atender os requisitos (nível físico) da arquitetura. A Figura 57 mostra a configuração dos MPSs após a definição dos componentes.

Conforme pode ser notado no esquema da Figura 57, o sistema produtivo está em conformidade com o PFS da Figura 34 (atividade [Mundo Físico]), onde são definidos o início/fim do processo, os locais para processar as operações de

manufatura, os pontos de verificação (**PVs**) e de atualização (**PA**s) das operações. Cada um dos elementos da Figura 57 é detalhado na Tabela 4.

Figura 57 – Definição dos elementos essenciais para a descoberta de equipamentos no sistema de produção.

Fonte: Adaptado dos manuais técnicos do MPS fornecidos pela Festo.

6.2.4 Definição da RHE

Com base na Figura 57, os elementos da **RHE** (Rede Hierárquica de Equipamento) são organizados hierarquicamente juntamente com suas TOE (Tabela de Operações do Equipamento) e TLE (Tabela para Localização de Equipamento). O esquema dessa organização é apresentado na Figura 58, mais precisamente os nós que descendem de “*LSA*”⁴⁷ (Laboratório de Sistemas de Automação). Cada TOE apresenta as operações (OP) ligadas diretamente ao equipamento. Nota-se que num primeiro momento as TLE estão todas vazias, haja vista que o preenchimento dessas acontece conforme a execução dos processos de manufatura. O nó “*Site X*” é uma

⁴⁷ A notação utilizada para os identificadores dos nós da hierarquia é o identificador entre aspas duplas, itálico e fonte Times New Roman – exemplo: “*LSA*”.

representação de um local com um equipamento que pode estar em algum outro lugar na “USP” (Universidade de São Paulo) e que pode processar as operações OP_m e OP_n, porém, o mesmo não está explícito na Figura 57 e é utilizado apenas para fins de demonstração.

Tabela 4 – Descrição dos elementos do sistema produtivo.

Equipamento	Elemento	Descrição
Equipamento 1 (EQP_1)	IPM	Marca o início do processo de manufatura do produto.
	BF_1.1	Local onde o produto está armazenado até que contenha uma informação relacionada a sua produção.
	BF_1.2	Local para colocar o produto após o tratamento da operação no EQP_1.
	PV_1	Ponto de verificação onde o produto é verificado para determinar o seu encaminhamento a partir do EQP_1.
	OP_x	Local para processar a operação “X”.
	PA_1	Ponto de atualização da operação “X”.
	FPM_1	Caso o processo seja finalizado enquanto o produto estiver no EQP_1 o produto é enviado para este local.
Equipamento 2 (EQP_2)	PV_2	Ponto de verificação onde o produto é avaliado para determinar o seu encaminhamento a partir do EQP_2.
	PO_y	Ponto para processar a operação “Y”.
	PO_z	Ponto para processar a operação “Z”.
	BF_2.1	Local para armazenar o produto enquanto aguarda a próxima verificação.
	PA_2	Ponto de atualização de operação, após processar uma operação no EQP_2.
	FPM_2	Local para encaminhar o produto caso o processo seja finalizado enquanto estiver no EQP_2.
Equipamento 3 (EQP_3)	PV_3	Ponto de verificação no EQP_3 para determinar a rota do produto a partir deste equipamento.
	PO_v	Ponto para processar a operação “V” no equipamento EQP_3.
	PO_w	Ponto para processar a operação “W” no equipamento EQP_3.
	PA_3.1	Ponto para atualizar a operação após processamento da operação “V”.
	PA_3.2	Ponto para atualizar a operação após processamento da operação “W.”
	BF_3.1	Local para armazenamento do produto após processamento da operação “V” – o produto pode seguir para outro equipamento conforme operações exigidas.
	BF_3.2	Local para armazenamento do produto após processamento da operação “W” – o produto pode seguir para outro equipamento conforme operações exigidas.
	FPM_3	Fim do processo no equipamento EQP_3, caso o produto tenha sido finalizado.

Figura 58 – Um esquema dos elementos da RHE com as respectivas TOE e TLE (a partir do SP da Figura 57).

Fonte: O autor.

6.3 EXPERIMENTOS

Para os experimentos do processo de produção são utilizados produtos (tais como os mostrados na Figura 59, utilizados no MPS da Festo) identificados aleatoriamente com etiquetas RFID. É importante destacar que os produtos sem a identificação são tratados conforme suas características físicas, mantendo a programação convencional dos dispositivos de controle. Por meio da identificação dos produtos é possível processá-los independente das suas cores e formas. Desta maneira, as operações necessárias para manufaturar os produtos são configuradas conforme o conteúdo da Tabela 5. Para o sistema apresentado na Figura 57, as TOE e TLE dos equipamentos “EQP_1”, “EQP_2”, “EQP_3” e “EQP_N” da RHE têm o estado inicial conforme o conteúdo da Tabela 6.

Figura 59 – Produtos utilizados nos experimentos.

Fonte: o autor

Tabela 5 – Lista das operações exigidas pelos produtos.

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
OP_x	OP_x	OP_y	OP_z	OP_y	OP_v	OP_x	OP_w	OP_x	OP_z
	OP_y	OP_v	OP_w	OP_w		OP_w	OP_m	OP_z	OP_m
								OP_n	

Tabela 6 – TOE e TLE dos equipamentos na RHE.

EQP_1			EQP_2			EQP_3			EQP_N		
TOE	TLE		TOE	TLE		TOE	TLE		TOE	TLE	
OP	OP	EQP	OP	OP	EQP	OP	OP	EQP	OP	OP	EQP
OP_x			OP_y			OP_v			OP_m		
			OP_z			OP_w			OP_n		

Para testar os processos, conforme o esquema apresentado na Figura 57, os produtos são colocados na posição BF_1 do “EQP_1” e então submetidos ao PV_1, onde eles são identificados e encaminhados ao processamento de acordo com as ocorrências descritas nas subseções 6.3.1 à 6.3.11.

6.3.1 Manufatura do Produto 1 (P1)

A tabela CORPP do Produto 1 (P1) é definida conforme mostra a Tabela 7. A primeira operação é a OP_x. Diante dessa operação é verificada que a TOE do “EQP_1” satisfaz a operação e o produto é encaminhado para processamento e a “Situação” da operação é atualizada para “*Iniciada*”, conforme mostra a Tabela 8. Sendo assim, a TLE não requer atualização e o estado da **RHE** é mantido. Após o processamento da operação o produto passa pelo PA_1 onde a “Situação” de OP_x é atualizada para “*Concluída*”, conforme pode ser observada na Tabela 9. A seguir o produto segue para o BF_1.2 do “EQP_1”. Na atual “Situação” de P1, caso seja submetido a um PV, isto fará com que o produto seja enviado para um fim de processo (FPM), isto é, um local para armazenar o produto acabado.

Tabela 7 – CORPP do Produto 1.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 1	OP_x	1	Aberta	

Tabela 8 – CORPP do Produto 1 após iniciar processo OP_x.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 1	OP_x	1	Iniciada	

Tabela 9 – CORPP do Produto 1 após o processamento da operação OP_x.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 1	OP_x	1	Concluída	EQP_1

6.3.2 Manufatura do Produto 2 (P2)

A CORPP do P2 é definida conforme mostra a Tabela 10. A primeira operação é a OP_x. É verificada que a TOE do “EQP_1” satisfaz a operação. A “Situação” do produto é atualizada para “Iniciada” (Tabela 11) e o produto é encaminhado para o processamento. Após o processo a “Situação” do produto é atualizada para “Concluída” (Tabela 12) e o produto segue para BF_1.2. Na sequência o P2 é submetido ao PV_2 do “EQP_2”, onde é requisitada a operação OP_y e verificado na TOE que o “EQP_2” satisfaz a operação. O produto é enviado para processamento e a “Situação” atualizada para “Iniciada” (Tabela 14). Após o processo, a operação é atualizada para “Concluída” (Tabela 14) e o produto é enviado para o BF_2.1. No próximo ponto de verificação (PV) é notado que não há mais operações e P2 é enviado para o fim do processo. Como as operações solicitadas por P2 foram respectivamente encontradas nas TOE e não houve a necessidade de pesquisa na TLE, consequentemente não houve qualquer atualização na RHE.

Tabela 10 – CORPP do Produto 2.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 2	OP_x	1	Aberta	
	OP_y	2	Aberta	

Tabela 11 – CORPP do Produto 2 após iniciar a operação OP_x.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 2	OP_x	1	Iniciada	
	OP_y	2	Aberta	

Tabela 12 – CORPP do Produto 2 após o processamento da operação OP_x.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 2	OP_x	1	Concluída	EQP_1
	OP_y	2	Aberta	

Tabela 13 – CORPP do Produto 2 após iniciar a operação OP_y.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 2	OP_x	1	Concluída	EQP_1
	OP_y	2	Aberta	

Tabela 14 – CORPP do Produto 2 após o processamento da operação OP_y.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 2	OP_x	1	Concluída	EQP_1
	OP_y	2	Concluída	EQP_2

6.3.3 Manufatura do Produto 3 (P3)

A CORPP do Produto 3 apresenta a definição de duas operações (Tabela 15). A primeira operação é a OP_y seguida da operação OP_v. A partir do PV_1 é verificado que a TOE do “EQP_1” não satisfaz a operação OP_y. Então o procedimento para encontrar um equipamento é executado, onde é identificado o “EQP_2” na TOE do nó “Produção”. O “EQP_2” é retornado e definido para processar a operação. A TLE do “EQP_1” é atualizada contendo agora a informação do “EQP_2” para processar operação do tipo OP_y (a atualização é mostrada na Tabela 16). O produto é encaminhado para o “EQP_2” e a “Situação” da operação OP_y é atualizada para “Iniciada”, conforme mostra a Tabela 17. Após o processamento da operação o produto passa pelo PA_2 onde a “Situação” de OP_y é atualizada para “Concluída” e o “EID” para “EQP_2”, conforme pode ser observada na Tabela 18. A seguir o produto segue para o BF_2.1 e então é submetido a uma nova verificação no PV_3 do “EQP_3”. No PV_3 é requisitada a operação OP_v e identificado na TOE que o próprio “EQP_3” pode processá-la. Por fim o produto é processado em “EQP_3” e a “Situação” final da sua CORPP é mostrada na Tabela 19.

Tabela 15 – CORPP do Produto 3.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 3	OP_y	1	Aberta	
	OP_v	2	Aberta	

Tabela 16 – Atualização da TLE do EQP_1 na RHE.

EQP_1			EQP_2			EQP_3			EQP_N		
TOE	TLE		TOE	TLE		TOE	TLE		TOE	TLE	
OP	OP	EQP	OP	OP	EQP	OP	OP	EQP	OP	OP	EQP
OP_x	OP_y	EQP_2	OP_y			OP_v			OP_m		
			OP_z			OP_w			OP_n		

Tabela 17 – CORPP do Produto 3 após iniciar a operação OP_y.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 3	OP_y	1	Iniciada	
	OP_v	2	Aberta	

Tabela 18 – CORPP do Produto 3 após concluir a operação OP_y.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 3	OP_y	1	Concluída	EQP_2
	OP_v	2	Aberta	

Tabela 19 – CORPP do Produto 3 após concluir a operação OP_v.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 3	OP_y	1	Concluída	EQP_2
	OP_v	2	Concluída	EQP_3

6.3.4 Manufatura do Produto 4 (P4)

A CORPP do P4 é mostrada na Tabela 20. A partir do PV_1 é verificado que P4 requer a operação OP_z. A TOE do “EQP_1” não satisfaz essa operação e o procedimento para encontrar um equipamento é executado. É identificado que o “EQP_2” pode processá-la. A TLE do “EQP_1” é atualizada com a informação do “EQP_2” e a capacidade de processar a operação do tipo OP_z, conforme mostra a Tabela 21. O produto é encaminhado para o “EQP_2” e a “Situação” da operação OP_z é atualizada para “*Iniciada*”. Após o processamento da operação, o produto passa pelo PA_2 onde a “Situação” de OP_z é atualizada para “*Concluída*” e o “EID” para “EQP_2”. A seguir o produto segue para o BF_2.1 e então pode ser submetido a uma nova verificação no PV_3 do “EQP_3”. No PV_3 é requisitada a operação OP_w e identificado na TOE que o próprio “EQP_3” pode processá-la. A “Situação” da sua CORPP é mostrada na Tabela 22.

Tabela 20 – CORPP do Produto 4.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 4	OP_z	1	Aberta	
	OP_w	2	Aberta	

Tabela 21 – Atualização da TLE do EQP_1 na RHE com a operação OP_z.

EQP_1			EQP_2			EQP_3			EQP_N		
TOE	TLE		TOE	TLE		TOE	TLE		TOE	TLE	
OP	OP	EQP	OP	OP	EQP	OP	OP	EQP	OP	OP	EQP
OP_x	OP_y	EQP_2	OP_y			OP_v			OP_m		
	OP_z	EQP_2	OP_z			OP_w			OP_n		

Tabela 22 – CORPP do Produto 4 após o processamento das operações.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 4	OP_z	1	Concluída	EQP_2
	OP_w	2	Concluída	EQP_3

6.3.5 Manufatura do Produto 5 (P5)

A CORPP do P5 é mostrada na Tabela 23. A partir do PV_1 é verificado que P5 requer a operação OP_y. A TOE do “EQP_1” não satisfaz a operação e o procedimento de busca encontra o “EQP_2” na TLE do mesmo (Tabela 21). O produto é encaminhado para o “EQP_2”. Após o processamento e a devida atualização da “Situação” da operação o produto segue para o BF_2.1 podendo ser submetido a uma nova verificação no PV_3 do “EQP_3” onde é requisitada e processada a operação OP_w. A CORPP de P5 após o processamento das operações é mostrada na Tabela 24.

Tabela 23 – CORPP do Produto 5.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 5	OP_y	1	Aberta	
	OP_w	2	Aberta	

Tabela 24 – CORPP do Produto 5 após o processamento das operações OP_y e OP_w.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 5	OP_y	1	Concluída	EQP_2
	OP_w	2	Concluída	EQP_3

6.3.6 Manufatura do Produto 6 (P6)

O P6 requer a operação OP_v (Tabela 25). Iniciando no PV_1, observa-se que a TLE e TOE do “EQP_1” não contém a indicação do equipamento para processar a operação (Tabela 21). O procedimento de descoberta é executado e identifica-se o “EQP_3” com essa capacidade. O “EQP_3” é definido para processar a operação e a TLE de “EQP_3” passa a reconhecer o equipamento descoberto, conforme mostra a Tabela 26. Vale destacar que a TLE de “Produção” também é atualizada diante dessa situação, que é mostrada na Figura 60 (página 150). O produto é encaminhado para o “EQP_3” e a situação da operação OP_v é atualizada para “*Iniciada*”, e após o processamento o produto passa pelo PA_3.1 onde a “Situação” de OP_v é atualizada para “*Concluída*” e o produto é enviado para o BF_3.1.

Tabela 25 – CORPP do Produto 6.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 6	OP_v	1	Aberta	

Tabela 26 – Atualização da TLE do EQP_1 na RHE com a operação OP_v.

EQP_1			EQP_2			EQP_3			EQP_N		
TOE	TLE		TOE	TLE		TOE	TLE		TOE	TLE	
OP	OP	EQP	OP	OP	EQP	OP	OP	EQP	OP	OP	EQP
OP_x	OP_y	EQP_2	OP_y			OP_v			OP_m		
	OP_z	EQP_2	OP_z			OP_w			OP_n		
	OP_v	EQP_3									

6.3.7 Manufatura do Produto 7 (P7)

O P7 contém a CORPP de acordo com a Tabela 27. Partindo do PV_1, o P7 tem a operação OP_x realizada pelo “EQP_1”. No PV_2 é requisitada a operação OP_w e o equipamento de referência para a pesquisa é o “EQP_2”. Verifica-se que tanto TOE quanto TLE do “EQP_2” não reconhecem a operação. O procedimento de descoberta de equipamento encontra o “EQP_3” na TLE de “Produção”. A TLE do “EQP_2” é atualizada com a informação do “EQP_3” e a capacidade de processar a operação do tipo OP_w (Tabela 28). A Tabela 29 mostra a condição do P7 após o processamento das operações.

Tabela 27 – CORPP do Produto 7.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 7	OP_x	1	Aberta	
	OP_w	2	Aberta	

Tabela 28 – Atualização da TLE do EQP_2 na RHE com a operação OP_w.

EQP_1			EQP_2			EQP_3			EQP_N		
TOE	TLE		TOE	TLE		TOE	TLE		TOE	TLE	
OP	OP	EQP	OP	OP	EQP	OP	OP	EQP	OP	OP	EQP
OP_x	OP_y	EQP_2	OP_y	OP_w	EQP_3	OP_v			OP_m		
	OP_z	EQP_2	OP_z			OP_w			OP_n		
	OP_v	EQP_3									

Tabela 29 – CORPP do Produto 7 após o processamento das operações.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 7	OP_x	1	Concluída	EQP_1
	OP_w	2	Concluída	EQP_3

6.3.8 Manufatura do Produto 8 (P8)

A CORPP do P8 é apresentada na Tabela 30. No PV_1 é requisitada a OP_w que não é localizada nas TOE e TLE de “EQP_1” (Tabela 28). O procedimento de busca identifica o “EQP_3”. O produto é encaminhado para o equipamento encontrado e a TLE é atualizada conforme pode ser observado na Tabela 31. Após o processamento da operação no “EQP_3” o produto segue para o PA_3.2 e a seguir para o BF_3.2. Deste ponto o produto deve ser verificado em um PV, por exemplo, um transportador que contenha esse recurso. Na sequência a procedimento de busca encontra o “EQP_N” capacitado a processar a operação. O estado atualizado da CORPP do P8 é mostrado na Tabela 32.

Tabela 30 – CORPP do Produto 8.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 8	OP_x	1	Aberta	
	OP_w	2	Aberta	

Tabela 31 – Atualização da TLE do EQP_1 na RHE com a operação OP_w.

EQP_1			EQP_2			EQP_3			EQP_N		
TOE	TLE		TOE	TLE		TOE	TLE		TOE	TLE	
OP	OP	EQP	OP	OP	EQP	OP	OP	EQP	OP	OP	EQP
OP_x	OP_y	EQP_2	OP_y	OP_w	EQP_3	OP_v			OP_m		
	OP_z	EQP_2	OP_z			OP_w			OP_n		
	OP_v	EQP_3									
	OP_w	EQP_3									

Tabela 32 – CORPP do Produto 8 após o processamento das operações.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 8	OP_w	1	Concluída	EQP_3
	OP_m	2	Concluída	EQP_N

6.3.9 Manufatura do Produto 9 (P9)

A CORPP do P9 pode ser observada na Tabela 33. Seguindo a lógica apresentada nas subseções anteriores (6.3.1 à 6.3.8), a operação OP_x é identificada e processada no “EQP_1” e OP_z identificada e processada no “EQP_2” (conforme as informações da RHE – apresentada na Tabela 31). Após o processamento em “EQP_2, a próxima operação é a OP_n que é requisitada no PV_3 do “EQP_3”. Este equipamento não possui essa informação tanto na TOE quanto na TLE, o que exige a execução do procedimento de descoberta. O equipamento para processar a OP_n é o “EQP_N” (conforme a Tabela 31). P9 é encaminhado para esse equipamento e a

TLE do “EQP_3” é atualizada conforme a Tabela 34 e a CORPP do P9 será tal qual mostra a Tabela 35.

Tabela 33 – CORPP do Produto 9.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 9	OP_x	1	Aberta	
	OP_z	2	Aberta	
	OP_n	3	Aberta	

Tabela 34 – Atualização da TLE do EQP_1 na RHE com a operação OP_n.

EQP_1			EQP_2			EQP_3			EQP_N		
TOE	TLE		TOE	TLE		TOE	TLE		TOE	TLE	
OP	OP	EQP	OP	OP	EQP	OP	OP	EQP	OP	OP	EQP
OP_x	OP_y	EQP_2	OP_y	OP_w	EQP_3	OP_v	OP_n	EQP_N	OP_m		
	OP_z	EQP_2	OP_z			OP_w			OP_n		
	OP_v	EQP_3									
	OP_w	EQP_3									

Tabela 35 – CORPP do Produto 9 após o processamento das operações OPx, OP_z e OP_n.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 9	OP_x	1	Concluída	EQP_1
	OP_z	2	Concluída	EQP_2
	OP_n	3	Iniciada	

6.3.10 Manufatura do Produto 10 (P10)

O produto P10 requer as operações mostradas na

Tabela 36. A partir do PV_1 é identificada a necessidade de processar a operação OP_z. A TLE do “EQP_1” indica que esse processo pode ser executado pelo “EQP_2”. O produto é encaminhado e processado no “EQP_2” seguido da atualização da “Situação”. O produto segue para o PV_3 do “EQP_3”. A operação requisitada é a OP_m, porém a TOE do “EQP_3” não satisfaz a operação e o procedimento para descoberta encontra o “EQP_N”. O produto é enviado para um *buffer* onde aguarda o transporte para o equipamento e a TLE do “EQP_3” é atualizada contendo a informação do equipamento encontrado (Tabela 37). A situação corrente da CORPP do P10 é mostra na Tabela 38 e permanece desta forma até que o mesmo seja processado por “EQP_N”.

Tabela 36 – CORPP do Produto 10.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 10	OP_z	1	Aberta	
	OP_m	2	Aberta	

Tabela 37 – Atualização da TLE do EQP_3 na RHE com a operação OP_m.

EQP_1			EQP_2			EQP_3			EQP_N		
TOE	TLE		TOE	TLE		TOE	TLE		TOE	TLE	
OP	OP	EQP	OP	OP	EQP	OP	OP	EQP	OP	OP	EQP
OP_x	OP_y	EQP_2	OP_y	OP_w	EQP_3	OP_v	OP_n	EQP_N	OP_m		
	OP_z	EQP_2	OP_z			OP_w	OP_m	EQP_N	OP_n		
	OP_v	EQP_3									
	OP_w	EQP_3									

Tabela 38 – CORPP do Produto 10.

PID	Operação	Ordem	Situação	EID
Produto 10	OP_z	1	Concluída	EQP_2
	OP_m	2	Iniciada	

6.3.11 RHE atualizada após o processamento das operações

Após o processamento das operações definidas na CORPP dos produtos (Tabela 5) o conteúdo das TLE na **RHE** tem as informações que apontam para qual equipamento um produto pode ser enviado conforme a exigência das operações. A **RHE** atualizada é mostrada na Figura 60. O “EQP_1” passa a ter informações dos equipamentos que processam as operações OP_y, OP_z, OP_v e OP_w. Já o elemento “Produção” da hierarquia, que já possui por definição as operações OP_x, OP_y e OP_z, agora também passa a conhecer quem processa as operações OP_v e OP_w. O “EQP_2” tem na sua TLE a informação de que “EQP_3” é capaz de processar a operação OP_w. Similarmente a essas situações, o “EQP_3”, “Distribuição” e “LSA” passam a ter o conhecimento do equipamento capaz de processar OP_m e OP_n.

6.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Utilizando-se um sistema de produção modular (MPS) é desenvolvido um exemplo de aplicação da arquitetura proposta neste trabalho. O MPS é subdividido componentes conforme a Figura 34 e representados pelas atividades do [Mundo Físico], ou seja, os elementos físicos da camada ‘Ativo técnico’ que permitem identificar, encaminhar e processar produtos fisicamente conforme suas necessidades. Seguindo as especificações da arquitetura, foram adotadas as tecnologias para a implementação dos componentes das camadas ‘Integração’, ‘Comunicação’, ‘Informação’ e ‘Funcional’. Desta forma, tem-se a implementação

dos componentes conforme previstos na arquitetura em conformidade com o RAMI 4.0.

Figura 60 – Esquema dos elementos da RHE com as respectivas TOE e TLE após o processamento das operações.

Fonte: O autor.

Com a definição da **RHE** (Rede Hierárquica de Equipamentos) e a CORPP (Controle de Operações Requisitadas pelo Produto) dos produtos, tem-se os elementos essenciais para atender as exigências dos produtos e definir o equipamento a processá-los. Por meio da **RHE** e a CORPP tem-se a descoberta de equipamento para processar operações exigidas pelos produtos.

Baseada nas definições da **RHE** e CORPP tem-se os estágios e situações atualizadas de ambas durante e após o processamento de operações.

Por fim é apresentada a atualização da **RHE** contendo informações que direcionam para equipamentos capazes de processar operações que foram reconhecidos durante a execução do procedimento de descoberta. A **RHE** atualizada permite que a partir de um determinado ponto de verificação (**PV**) seja possível identificar e descobrir um equipamento capaz de processar uma informação. Esse procedimento evidencia a capacidade dos equipamentos trocarem informações com produtos (envolvendo processos físicos e lógicos, desde a camada física até os componentes digitalizados) e, desta forma, comportarem-se conforme as

necessidades dos produtos, contribuindo para a produção personalizada que é uma das expectativas da Indústria 4.0.

7 CONCLUSÕES

Tendo em vista às expectativas em torno da Indústria 4.0, tais como a necessidade de soluções para a sua implementação prática, o anseio pela criação de produtos personalizados e sob demanda e conseqüentemente a exigência de sistemas de produção ágeis e autônomos integrados a redes colaborativas de serviços, este trabalho tratou de uma arquitetura do sistema produtivo para a descoberta e seleção de equipamentos para processar operações conforme os requisitos dos produtos em processo de manufatura. A arquitetura foi desenvolvida em conformidade com o modelo de arquitetura de referência para a Indústria 4.0 (RAMI 4.0).

As camadas e componentes da arquitetura proposta especificam as funcionalidades necessárias para a descoberta e escolha de equipamentos. A organização dos equipamentos por meio da **RHE** (Rede Hierárquica de Equipamentos) e suas respectivas TOE (Tabela de Operações do Equipamentos) e TLE (Tabela de Localização de Equipamentos) fornecem dados suficientes para o procedimento de busca apresentado neste trabalho, que apresenta um comportamento similar ao DNS para resolver o equipamento para processar uma operação. Esta é uma característica que auxilia na descoberta de um equipamento conforme uma requisição específica. Logo, a arquitetura proposta e seus componentes contribuem para a autonomia dos sistemas de produção no que diz respeito à tomada de decisão de equipamentos a serem utilizados para o processamento de operações personalizadas.

A definição dos pontos de verificação (**PV**) e pontos de atualização (**PA**), assim como o procedimento para a descoberta de equipamento são necessários para que haja a devida interação entre os mundos físico e virtual de modo que um equipamento seja descoberto para processar a operação exigida pelo produto. Assim sendo, efetiva-se a necessidade de se definir e configurar os **PVs** e **PA**s. O primeiro para que o processo de descoberta de equipamento seja realizado, e o segundo para garantir a atualização das operações processadas.

Os componentes da arquitetura e suas interações foram modelados por meio da técnica PFS/RdP. A modelagem foi desenvolvida a partir de um nível abstrato de requisitos e dos elementos necessários para estabelecer a integração dos mundos físico e virtual. Através de refinamentos sucessivos foram obtidos os elementos

funcionais da arquitetura. Os modelos envolvem uma série de passos que representam a interação entre diferentes níveis da arquitetura, indo desde a camada física (**'Ativo Técnico'**, **'Integração'** e **'Comunicação'**), considerando a comunicação entre máquinas, até os componentes lógicos das camadas **'Informação'** e **'Funcional'** presentes no RAMI 4.0. Os comportamentos dinâmicos entre as camadas e seus componentes foram verificados e validados por meio de modelos desenvolvidos em rede de Petri. Os projetos de sistemas a partir do RAMI 4.0 devem respeitar a sua organização em camadas, e o desenvolvimento de componentes deve ser realizada por meio de recursos e tecnologias heterogêneas que trocam mensagens entre si para resolver problemas de automação e controle, sendo assim este trabalho mostra que a técnica PFS/RdP é efetiva e não só para a modelagem e análise deste tipo de sistema, mas também para a especificação funcional dos componentes envolvidos.

A arquitetura foi aplicada em um sistema modular de produção (MPS), onde foi possível observar o fluxo dos produtos onde os mesmos recebem tratamentos individuais, sendo processados segundo as suas especificidades. Isto assegura a produção sob demanda e personalizada conforme as necessidades do consumidor, onde cada produto pode ser identificado e, conforme as informações de referência na tabela CORPP (Controle de Operações Requisitadas pelo Produto), são definidas automaticamente o equipamento e suas configurações para executar o devido processo de manufatura. Por meio da aplicação em um MPS foi ainda possível testar e avaliar os procedimentos de implementação da arquitetura, onde foram identificadas as tecnologias que podem ser utilizadas para a implementação e as etapas envolvidas neste processo.

Vale destacar ainda que a arquitetura foi aplicada em um MPS sem as características da Indústria 4.0, evidenciando que ela é aplicável a sistemas produtivos já existentes, sem a necessidade de grandes investimentos. Também foi possível comprovar que um sistema produtivo pode continuar operando juntamente com os sistemas da I4.0, uma vez que os produtos quando sem etiquetas RFID são tratados conforme a programação prévia dos equipamentos (respeitando suas características físicas, por exemplo: cor, perfuração, etc.). Por outro lado, quando os produtos são identificados por suas etiquetas RFID eles são tratados individualmente, caracterizando a produção individual e personalizada.

A arquitetura apresentada neste trabalho, estando em conformidade com o RAMI 4.0, é uma solução efetiva para a implementação da comunicação entre equipamentos e produtos no contexto da Indústria 4.0, assegurando autonomia para a descoberta de equipamentos para processar operações conforme as necessidades dos produtos.

Em relação aos modelos de arquitetura de referência pesquisados, este trabalho vai além de um nível abstrato, apresentando os componentes da arquitetura e suas interações com a respectiva implementação, os quais são verificados e validados por meio da técnica formal PFS/RdP.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Diante dos estudos realizados e a arquitetura apresentada neste trabalho, são destacados alguns pontos que podem ser considerados para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

- A aplicação da arquitetura em casos de produção onde a RHE é formada por equipamentos distribuídos em duas ou mais empresas (por exemplo, a realização de experimentos com equipamentos de universidades/laboratórios distintos), possibilitando a manufatura de produtos sob demanda e personalizada conforme a disponibilidade de recursos por meio de parceiros pertencentes a redes colaborativas de serviços.
- A otimização da arquitetura para permitir a descoberta de equipamento ainda na camada '**Ativo técnico**', ou seja, por meio de uma inteligência do próprio equipamento, considerando que todo o processo lógico de identificação da operação e descoberta deste trabalho acontece na camada '**Funcional**' com o uso dos componentes **EV** e **RHE** da camada '**Informação**'.
- Fatores como desempenho, tempo de resposta, disponibilidade de serviço, viabilidade de implantação da arquitetura devem ser verificados e avaliados.
- Desenvolvimento de procedimentos que proporcionem meios para a digitalização de equipamentos na **RHE** com base na especificação de componentes da Indústria 4.0 (I4.0C) baseado no RAMI 4.0, isto é a sistemática para a componentização de “coisas” para a I4.0.

- Neste trabalho cada operação é considerada uma macro operação, no entanto tratar a sua granularidade é uma necessidade, haja vista que, por exemplo, uma peça pode exigir de um mesmo equipamento um conjunto de operações, tais como broquear, perfilar, facear e rosquear. No entanto, neste trabalho cada operação é tratada isoladamente conforme a sequência definida, ou seja, após cada operação o produto deve repetir todo o ciclo de verificação, sendo que, isso pode ser minimizado conforme as operações demandadas e a disponibilidade dos equipamentos.

REFERÊNCIAS

- ADOLPH, L.; ANLAHR, T.; BEDENBENDER, H.; BENTKUS, A.; BRUMBY, L.; DIEDRICH, C.; DIRZUS, D.; ELAMAS, F.; EPPLE, U.; FRIEDRICH, J.; FRITZ, J.; GEBHARDT, H.; GEILEN, J.; HECKER, C.; HEIDEL, R.; HEMBERGER, K.; HIENSCH, S.; HILGENDORF, E.; HÖRCHER, G.; KLEMM, E.; MEHRFELD, J. **German Standardization Roadmap Industry 4.0DIN/DKE Roadmap**, 2016. . Disponível em: <<http://www.din.de/en/din-and-our-partners/press/press-releases/updated-german-standardization-roadmap-on-industry-4-0-110576>>. Acesso em: 13 jul. 2017.
- ADOLPHS, P.; BEDENBENDER, H.; DIRZUS, D.; EHLICH, M.; EPPLE, U.; HANKEL, M.; HEIDEL, R.; HOFFMEISTER, M.; HUHLE, H.; KÄRCHER, B.; KOZIOLEK, H.; PICHLER, R.; POLLMEIER, S.; SCHEWE, F.; WALTER, A.; WASER, B.; WOLLSCHLAEGER, M. **Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0)VDI/VDE and ZVEI**, 2015. . Disponível em: <<https://www.zvei.org/en/subjects/industry-4-0/the-reference-architectural-model-rami-40-and-the-industrie-40-component/>>.
- ANSI/ISA-95.00.01-2010. Enterprise-Control System Integration – Part 1 : Models and Terminology. 2010.
- ASHTON, K. **That “Internet of Things” ThingRFiD Journal**, 2009. . Disponível em: <[http://www.itrco.jp/libraries/RFIDjournal-That Internet of Things Thing.pdf%5Cnpapers3://publication/uuid/8191C095-0D90-4A17-86B0-550F2F2A6745](http://www.itrco.jp/libraries/RFIDjournal-That%20Internet%20of%20Things.pdf%5Cnpapers3://publication/uuid/8191C095-0D90-4A17-86B0-550F2F2A6745)>. Acesso em: 31 jul. 2017.
- ASTRÖM, K. J.; KUMAR, P. R. Control: A perspective. **Automatica**, v. 50, n. 1, p. 3–43, jan. 2014.
- BANDYOPADHYAY, D.; SEN, J. Internet of things: Applications and challenges in technology and standardization. **Wireless Personal Communications**, v. 58, n. 1, p. 49–69, 2011.
- BANGEMANN, T.; BAUER, C.; BEDENBENDER, H.; DIESNER, M.; EPPLE, U.; ELMAS, F.; FRIEDRICH, J.; GOLDSCHMIDT, T.; GÖBE, F.; GRÜNER, S.; HANKEL, M.; HESSELMANN, K.; HÜTTEMANN, G.; KEHL, H.; LÖWEN, U.; PFROMMER, J.; SCHLEIPEN, M.; SCHLICH, B.; USLÄNDER, T.; WERTERKAMP, C.; WINTER, A.; WOLLSCHLAEGER, M. **Industrie 4.0 - Technical Assets: Basic terminology concepts, life cycles and administration models**, 2016. . Disponível em: <<http://publica.fraunhofer.de/documents/N-432116.html>>. Acesso em: 30 jul. 2017.
- BASSI, A.; BAUER, M.; FIEDLER, M.; KRAMP, T.; VAN KRANENBURG, R.; LANGE, S.; MEISSNER, S. **Enabling things to talk: Designing IoT solutions with the IoT architectural reference model**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- BAUER, M.; BOUSSARD, M.; BUI, N.; DE LOOF, J.; MAGERKURTH, C.; MEISSNER, S.; NETTSTRÄTER, A.; STEFA, J.; THOMA, M.; WALEWSKI, J. W. IoT Reference Architecture. In: **Enabling Things to Talk**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013a. p. 163–211.

BAUER, M.; BUI, N.; LOOF, J. de; MAGERKURTH, C.; NETTSTRÄTER, A.; STEFA, J.; WALEWSKI, J. W. IoT Reference Model. In: BASSI, A.; BAUER, M.; FIEDLER, M.; KRAMP, T.; KRANENBURG, R. VAN; LANGE, S.; MEISSNER, S. (Ed.). **Enabling Things to Talk**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013b. p. 113–162.

BECHTOLD, J.; LAUENSTEIN, C.; KERN, A.; BERNHOFER, L. **Industry 4.0 - The Capgemini Consulting View**. Disponível em: <<https://www.de.capgemini-consulting.com/resources/industry-40-capgemini-consulting>>. Acesso em: 11 jun. 2017.

BOUSSARD, M.; MEISSNER, S.; NETTSTRÄTER, A.; OLIVEREAU, A.; SEGURA, A. S.; THOMA, M.; WALEWSKI, J. W. A Process for Generating Concrete Architectures. In: **Enabling Things to Talk**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 45–111.

BRETTEL, M.; FRIEDERICHSEN, N.; KELLER, M.; ROSENBERG, M. How Virtualization , Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape : v. 8, n. 1, p. 37–44, 2014.

BROY, M. **Cyber-Physical Systems Innovation durch Software-Intensive eingebettet Systeme** acatech Diskutiert, 2010. . Disponível em: <<http://www.acatech.de/de/publikationen/berichte-und-dokumentationen/acatech/detail/artikel/cyber-physical-systems-innovation-durch-softwareintensive-eingebetet-systeme.html%5Cnhttp://link.springer.com/10.1007/978-3-642-14901-6>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

BRYNJOLFSSON, E.; MCAFEE, A. The Second Machine Age - Work, progress, and prosperity in a Time of Brilliant Technologies. **ILR Review**, v. 68, n. 2, p. 1–142, 2014. Disponível em: <<http://ilr.sagepub.com/lookup/doi/10.1177/0019793914565342>>. Acesso em: 30 jul. 2017.

BUILDING Smarter Manufacturing With The Internet of Things. , 2014. . Disponível em: <http://cdn.iotwf.com/resources/6/iot_in_manufacturing_january.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2017.

CHANTANAYINGYONG, F. M. What is the theme of Davos 2016 ? 2016. Disponível em: <<https://www.weforum.org/agenda/2015/11/what-is-the-theme-of-davos-2016/>>. Acesso em: 30 jul. 2017.

COMER, D. E. **Redes de computadores e Internet: abrange transmissão de dados, ligação inter-redes e Web**. Porto Alegre: Bookman, 2001.

COULOURIS, G.; DOLLIMORE, J.; KINDBERG, T. **Sistemas Distribuídos: Conceitos e Projeto**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.

CRNKOVIC, I.; IVICA. Component-based software engineering for embedded systems. In: Proceedings of the 27th international conference on Software engineering - ICSE '05, New York, New York, USA. **Anais...** New York, New York, USA: ACM Press, 2005. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1062455.1062631>>. Acesso em: 28 jan. 2018.

DA SILVA, R. M.; ARAKAKI, J.; JUNQUEIRA, F.; SANTOS FILHO, D. J.; MIYAGI, P. E. Modeling of active holonic control systems for intelligent buildings. **Automation in Construction**, v. 25, p. 20–33, 2012.

DA SILVA, R. M.; JUNQUEIRA, F.; SANTOS FILHO, D. J.; MIYAGI, P. E. Control architecture and design method of reconfigurable manufacturing systems. **Control Engineering Practice**, v. 49, p. 87–100, 2016.

DA SILVA, R. M.; WATANABE, E. H.; BLOS, M. F.; JUNQUEIRA, F.; SANTOS FILHO, D. J.; MIYAGI, P. E. Modeling of Mechanisms for Reconfigurable and Distributed Manufacturing Control System. In: [s.l.] Springer, Cham, 2015. p. 93–100.

DE LAS HERAS, R.; BAUER, M.; SANTOS, N.; GRUSCHKA, N.; VOELKSEN, G.; CHRISTOPHE, B.; FREDJ, S. Ben; CASSAR, G.; ZEYBEK, E.; OLIVEREAU, A.; VILLALBA, I. S. **The Internet of Things Architecture - Project Internal Report D4 . 1 Concepts and Solutions for Identification and Lookup of IoT ResourcesIoT-A Project**, 2011. . Disponível em: <www.meet-iot.eu/deliverables-IOTA/D4_1.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2017.

DENGLER, D.; BLOCHER, A. **SmartF-IT – Cyber-physical Systems Manage the Complexities of Next Generation Multiadaptive Factories**. Disponível em: <<http://www.dfki.de/web/news/dfki-cebit-2015/smartf-it>>. Acesso em: 31 jul. 2017.

DORST, W.; GLOHR, C.; HAHN, T.; LOEWEN, U.; ROSEN, R.; SCHIEMANN, T.; VOLLMAR, F.; WINTERHALTER, C.; DIEGNER, B.; DÜMMER, M.; ERKER, S.; HERFS, W.; HILGER, C.; JÄNICKE, L.; JASPERNEITE, J.; KALHOFF, J.; KUBACH, U.; LÖWEN, U.; MATTIS, G.; MENGES, G.; MILDNER, F.; QUETSCHLICH, M.; STEFFENS, E.-J.; STIEDL, T.; ADOLPHS, P.; BEDENBENDER, H.; EHILCH, M.; EPPEL, U.; HANKEL, M.; HEIDEL, R.; HOFFMEISTER, M.; HUHLE, H.; KÄRCHER, B.; KOZIOLEK, H.; PICHLER, R.; POLLMEIER, S.; SCHEWE, F.; SCHULZ, T.; SCHWEICHART, K.; WALTER, A.; WASER, B.; WOLLSCHLAEGER, M.; JÄNICKE, L.; JOCHEM, M.; KAISER, H.; KISCH, M.; KLASSEN, W.; LEHMANN, J.; LINKE, L.; MEHRFELD, J.; SANDNER, M. **Implementation Strategy Industrie 4.0: Report on the results of the Industrie 4.0 Platform**, 2016. . Disponível em: <<https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Implementation-Strategy-Industrie-40-Report-on-the-results-of-the-Industrie-40-Platform.html>>. Acesso em: 1 jun. 2017.

DUSTDAR, S.; PAPAZOGLU, M. P. Services and Service Composition – An Introduction (Services und Service Komposition – Eine Einführung). **it - Information Technology**, v. 50, n. 2, p. 86–92, fev. 2008. Disponível em: <<http://www.degruyter.com/doi/10.1524/itit.2008.0468>>. Acesso em: 13 nov. 2014.

ENGELHARDT, P.; REINHART, G. Approach for an RFID-based situational shop floor control. **IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management**, p. 444–448, 2012.

ERL, T. **SOA: Princípios de Design de Serviços**. São Paulo: Pearson, 2009.

ESPADA, J. P.; MARTÍNEZ, O. S.; LOVELLE, J. M. C.; G-BUSTELO, B. C. P.; ÁLVAREZ, M. Á.; GARCÍA, A. G. Modeling architecture for collaborative virtual objects based on services. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 34, n. 5, p. 1634–1647, set. 2011.

FATTORI, C. C.; JUNQUEIRA, F.; SANTOS FILHO, D. J.; MIYAGI, P. E. Service composition modeling using interpreted Petri net for system integration. **2011 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2011**, p. 696–701, 2011a.

FATTORI, C. C.; JUNQUEIRA, F.; SANTOS FILHO, D. J.; MIYAGI, P. E. Modeling of manufacturing execution in disperse productive systems using service oriented technique. **IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)**, v. 18, n. PART 1, p. 6413–6418, 2011b.

FLEISCHMANN, H.; KOHL, J.; FRANKE, J. A reference architecture for the development of socio-cyber-physical condition monitoring systems. **2016 11th System of Systems Engineering Conference (SoSE)**, p. 1–6, jun. 2016.

GAMA, K.; TOUSEAU, L.; DONSEZ, D. Combining heterogeneous service technologies for building an Internet of Things middleware. **Computer Communications**, v. 35, n. 4, p. 405–417, 2012.

GERACI, A.; KATKI, F.; MCMONEGAL, L.; MEYER, B.; PORTEOUS, H. IEEE Standard Computer Dictionary. A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries. **IEEE Std 610**, 1991.

GILL, S. **Industry prepares for the next industrial revolution**. Disponível em: <<http://www.controlengueurope.com/article/58949/Industry-prepares-for-the-next-industrial-revolution-.aspx>>. Acesso em: 17 jan. 2018.

GORECKY, D.; SCHMITT, M.; LOSKYLL, M.; ZÜHLKE, D. Human-machine-interaction in the industry 4.0 era. **Proceedings - 2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2014**, p. 289–294, 2014.

GRANGEL-GONZÁLEZ, I.; HALILAJ, L.; COSKUN, G.; AUER, S.; COLLARANA, D.; HOFFMEISTER, M. Towards a Semantic Administrative Shell for Industry 4.0 Components. 7 jan. 2016. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1601.01556>>. Acesso em: 17 jun. 2016.

GREGOR, M.; HERCKO, J.; GRZNAR, P. The factory of the future production system research. In: 2015 21st International Conference on Automation and Computing (ICAC), **Anais...IEEE**, set. 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7313998/>>. Acesso em: 9 jan. 2018.

GUBBI, J.; BUYYA, R.; MARUSIC, S.; PALANISWAMI, M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. **Future Generation Computer Systems**, v. 29, n. 7, p. 1645–1660, 2013.

GUTIERREZ, C.; GARBAJOSA, J.; DIAZ, J.; YAGUE, A. Providing a consensus definition for the term “Smart Product”. **Proceedings of the International Symposium and Workshop on Engineering of Computer Based Systems**, p. 203–211, 2013.

HÅKANSSON, A.; HARTUNG, R. An Infrastructure for Individualised and Intelligent Decision-making and Negotiation in Cyber-physical Systems. **Procedia Computer Science**, v. 35, p. 822–831, 2014.

HANNAH, M. **Key Enablers of an Industrial Internet of Things Network Infrastructure**. Disponível em:

<<https://www.automationworld.com/article/topics/industrial-internet-things/key-enablers-industrial-internet-things-network>>. Acesso em: 31 jul. 2017.

HASEGAWA, K.; MIYAGI, P. E.; SANTOS FILHO, D. J.; TAKAHASHI, K.; SUGISAWA, M. On Resource Arc for Petri Net Modelling of Complex Resource Sharing System. **Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications**, v. 26, n. 3, p. 423–437, 1999.

HENG, S. Industry 4.0 - Upgrading of Germany's industrial capabilities on the horizon. **Current Issues - Sector research**, p. 16, 23 abr. 2014. Disponível em: <https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2656608>. Acesso em: 30 jul. 2017.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. **Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences**, v. 2016–March, p. 3928–3937, 2016.

HO, E.; JACOBS, T.; MEISSNER, S.; MEYER, S.; MONJAS, M.-A.; SEGURA, A. S. ARM Testimonials. In: **Enabling Things to Talk**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 279–322.

IEC-62541-100:2015. OPC Unified Architecture - Part 100: Device Interface. 2015. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/21987>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

IOTWF. **The Internet of Things Reference Model** CISCO in Internet of Things World Forum. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://cdn.ietf.org/publications/resources/71/IoT_Reference_Model_White_Paper_June_4_2014.pdf>. Acesso em: 7 jun. 2017.

ISO/IEC/IEEE42010:2011. Systems and software engineering — Architecture description. 2011.

JAZDI, N. Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. **Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR 2014**, p. 1–4, maio 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6857843/>>. Acesso em: 24 jun. 2017.

JENSEN, K. **Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use Volume 1**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1992.

JUNQUEIRA, F.; MIYAGI, P. E. A new method for the hierarchical modelling of productive systems. **IFIP International Federation for Information Processing**, v. 220, p. 479–488, 2006.

JUNQUEIRA, F.; MIYAGI, P. E. Modelagem e simulação distribuída de sistema produtivo baseados em rede de Petri. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 20, n. 1, p. 1–19, 2009.

KAGERMANN, H.; RIEMENSBERGER, F. Recommendations for the Strategic Initiative Web-based Services for Business. **acatech**, 2014. Disponível em:

<<http://www.acatech.de>>. Acesso em: 30 jul. 2017.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. **Final report of the Industrie 4.0 Working Group**, n. April, p. 82, 2013. Disponível em: <<http://www.acatech.de/de/publikationen/stellungnahmen/kooperationen/detail/artikel/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-40-final-report-of-the-industr.html>>. Acesso em: 30 nov. 2017.

KANG, H. S.; LEE, J. Y.; CHOI, S.; KIM, H.; PARK, J. H.; SON, J. Y.; KIM, B. H.; NOH, S. D. Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology**, v. 3, n. 1, p. 111–128, 2016.

KARAKOSTAS, B. A DNS Architecture for the Internet of Things: A Case Study in Transport Logistics. **Procedia Computer Science**, v. 19, p. 594–601, 2013.

KASTNER, W.; KOFLER, M.; JUNG, M.; GRIDLING, G.; WEIDINGER, J. Building automation systems integration into the Internet of Things the IoT6 approach, its realization and validation. **19th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2014**, 2014.

KOPÁCSI, S.; KOVÁCS, G. L.; NACSA, J. Some aspects of dynamic 3D representation and control of industrial processes via the Internet. **Computers in Industry**, v. 64, p. 1282–1289, 2013.

KRAMP, T.; VAN KRANENBURG, R.; LANGE, S. Introduction to the Internet of Things. In: **Enabling Things to Talk**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 1–10.

KRILL, P. **Você sabe o que é Edge Computing, e por que o modelo é tão importante?** Disponível em: <<http://cio.com.br/tecnologia/2017/03/06/voce-sabe-o-que-e-edge-computing-e-por-que-o-modelo-e-tao-importante/>>. Acesso em: 7 jun. 2017.

KUK, S. H.; KIM, H. S.; LEE, J.-K.; HAN, S.; PARK, S.-W. An e-Engineering framework based on service-oriented architecture and agent technologies. **Computers in Industry**, v. 59, n. 9, p. 923–935, 2008.

KUMAR, R.; BOSE, A. K. Internet of Things and OPC UA. **The Eleventh International Conference on Networking and Services**, n. c, p. 38–43, 2015.

KUMAR, B. V.; NARAYAN, P.; NG, T. **Implementando SOA Usando Java EE**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2012.

LANGMANN, R.; ROJAS-PEÑA, L. PLCs as Industry 4.0 Components in Laboratory Applications. **ijOE**, v. 12, n. 7, p. 37–44, 2016a.

LANGMANN, R.; ROJAS-PEÑA, L. F. A PLC as an Industry 4.0 component. **13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV)**, n. February, p. 10–15, 2016b.

LASI, H.; FETTKE, P.; KEMPER, H.-G.; FELD, T.; HOFFMANN, M. Industry 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, v. 6, n. 4, p. 239–242, 2014.

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

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.

LESSARD, C. **Engineering the Industrial Internet of Things**. Disponível em: <<https://www.automationworld.com/article/topics/industrial-internet-things/engineering-industrial-internet-things>>. Acesso em: 31 jul. 2017.

LIN, S.-W.; MILLER, B.; DURAND, J.; JOSHI, R.; DIDIER, P.; CHIGANI, A.; TORENBEEK, R.; DUGGAL, D.; MARTIN, R.; BLEAKLEY, G.; KING, A.; MOLINA, J.; SCHRECKER, S.; LEMBREE, R.; SOROUGH, H.; GARBIS, J.; CRAWFORD, M.; HARPER, E.; RAMAN, K.; WITTEN, B. Industrial Internet Reference Architecture. p. 1–101, 2015. Disponível em: <<http://www.iiconsortium.org/IIRA.htm>>. Acesso em: 31 jan. 2018.

LIU, M.; MA, J.; LIN, L.; GE, M.; WANG, Q.; LIU, C. Intelligent assembly system for mechanical products and key technology based on internet of things. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 28, n. 2, p. 271–299, 2017.

LIU, W.; SU, J. A solution of dynamic manufacturing resource aggregation in CPS. **2011 6th IEEE Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference**, p. 65–71, 2011.

LU, Y.; XU, X.; XU, J. Development of a Hybrid Manufacturing Cloud. **Journal of Manufacturing Systems**, 2014.

MACDOUGALL, W. Industrie 4.0 - Smart Manufacturing for the Future. **Germany Trade & Invest**, 2014. Disponível em: <<https://www.gtai.de/GTAI/Navigation/EN/Invest/Service/Publications/business-information,t=industrie-40--smart-manufacturing-for-the-future,did=917080.html>>. Acesso em: 20 dez. 2017.

MCFARLANE, D.; GIANNIKAS, V.; WONG, A. C. Y.; HARRISON, M. Product intelligence in industrial control: Theory and practice. **Annual Reviews in Control**, v. 37, n. 1, p. 69–88, 2013.

MEISSNER, S.; DOBRE, D.; THOMA, M.; MARTÍN, G. Internet of Things Architecture IoT-A Project Deliverable D2.1 – Resource Description Specification Initial contributions to section 3.3.1 Mapping Domain Model to Resource Model. 2012. Disponível em: <http://www.meet-iot.eu/deliverables-IOTA/D2_1.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2017.

MELL, P.; GRANCE, T. The NIST Definition of Cloud Computing Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. **Nist Special Publication**, v. 145, p. 7, 2011. Disponível em: <<http://www.mendeley.com/research/the-nist-definition-about-cloud-computing/>>. Acesso em: 31 jan. 2018.

MELO, J. I. G. **Arquitetura com orientação a serviços para sistemas produtivos teleoperados e dispersos**. 2011. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3152/tde-19072011-105101/>>. Acesso em: 31 jul. 2017.

MELO, J. I. G.; JUNQUEIRA, F.; MIYAGI, P. E. Towards Modular and Coordinated Manufacturing Systems Oriented To Services. **Dyna-Colombia**, v. 77, n. 163, p. 201–210, 2010.

MELO, J. I. G.; SOUIT, S.; FILHO, D. J. S.; JUNQUEIRA, F.; MIYAGI, P. E. A systematical approach to expose manufacturing system as a service. **2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2010**, 2010.

MIYAGI, P. E. **Controle Programável**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1996.

MONOSTORI, L. Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. **Procedia CIRP**, v. 17, p. 9–13, 2014.

MONOSTORI, L.; KÁDÁR, B.; BAUERNHANS, T.; KONDOH, S.; KUMARA, S.; REINHART, G.; SAUER, O.; SCHUH, G.; SIHN, W.; UEDA, K. Cyber-physical systems in manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 65, n. 2, 2016.

PAUKER, F.; FRÜHWIRTH, T.; KITTL, B.; KASTNER, W. A Systematic Approach to OPC UA Information Model Design. In: *Procedia CIRP*, **Anais...**2016.

PÉREZ, F.; IRISARRI, E.; ORIVE, D.; ESTEVEZ, E. A CPPS Architecture approach for Industry 4.0. **IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)**, 2015.

PESSOA, M. A. O. **Arquitetura de sistema de planejamento e controle da produção no contexto de empresa virtual**. 2015. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3152/tde-09092015-151246/>>. Acesso em: 31 jul. 2017.

PESSOA, M. A. O.; JUNQUEIRA, F.; SANTOS FILHO, D. J.; MARUYAMA, N.; MOSCATO, L. A.; MIYAGI, P. E. Virtual Enterprise Planning System using time windows and capacity constraint concepts. **IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)**, p. 2851–2856, 2012.

PESSOA, M. A. O.; MONTESCO, R. A. E.; JUNQUEIRA, F.; DOS SANTOS FILHO, D. J.; MIYAGI, P. E. Time windows and constraint programming to deal with strong restriction in the due date of productive systems. **Annual Reviews in Control**, v. 38, n. 1, p. 134–146, 2014.

PISCHING, M. A.; JUNQUEIRA, F.; SANTOS FILHO, D. J.; MIYAGI, P. E. Service composition in the cloud-based manufacturing focused on the industry 4.0. In: **IFIP Advances in Information and Communication Technology**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2015a. 450p. 65–72.

PISCHING, M. A.; JUNQUEIRA, F.; SANTOS FILHO, D. J.; MIYAGI, P. E. An Architecture for Organizing and Locating Services to the Industry 4.0. **23rd ABCM Intern. Congr. of Mechanical Engineering**, 2015b.

PISCHING, M. A.; JUNQUEIRA, F.; SANTOS FILHO, D. S.; MIYAGI, P. E. Architecture for Industry 4.0: Related issues about modelling and simulation. **XXI Congresso Brasileiro de Automática**, p. 545–550, 2016.

PRAMUDIANTO, F.; SIMON, J.; BIRLINGHOVEN, S.; GERMANY, S. A.; KHALEEL, H.; PASTRONE, C.; BOGGIO, V. P. C. Prototyping the Internet of Things for the Future Factory Using a SOA-based Middleware and Reliable WSNs. **IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)**, 2013.

PRESSMAN, R. S.; MAXIM, B. **Engenharia de Software**. 8. ed. Porto Alegre: Grupo A, 2016.

RAPHAEL, C. **What's the difference between edge computing and cloud computing?** Disponível em: <<https://www.quora.com/Whats-the-difference-between-edge-computing-and-cloud-computing>>. Acesso em: 7 jun. 2017.

RIO, R. **Where Is the Edge?** Disponível em: <https://dzone.com/articles/where-is-the-edge?oid=googleplus&utm_content=buffere7e43&utm_medium=social&utm_source=plus.google.com&utm_campaign=buffer>. Acesso em: 7 jun. 2017.

SANTOS FILHO, J. D.; SILVA, J. R.; MARUYAMA, N.; MIYAGI, P. E. Estruturação da modelagem de processos em sistemas produtivos. **IFAC SBA SBAI**, 2001.

SCHUH, G.; POTENTE, T.; VARANDANI, R.; HAUSBERG, C.; FRÄNKEN, B. Collaboration moves productivity to the next level. **Procedia CIRP**, v. 17, p. 3–8, 2014a.

SCHUH, G.; POTENTE, T.; VARANDANI, R.; SCHMITZ, T. Global Footprint Design based on genetic algorithms – An “Industry 4.0” perspective. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 63, n. 1, p. 433–436, 2014b.

SCHWAB, K. **The Fourth Industrial Revolution**. United States: Crown Business, 2016.

SEIGER, R.; KELLER, C.; NIEBLING, F.; SCHLEGEL, T. Modelling Complex and Flexible Processes for Smart Cyber-physical Environments. **Journal of Computational Science**, 2014.

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, p. 218–238, 2014.

SHI, J.; WAN, J.; YAN, H.; SUO, H. A survey of Cyber-Physical Systems. **2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)**, p. 1–6, 2011.

SOMMERVILLE, I. **Software Engineering**. 10 edition ed. Boston: Pearson, 2015.

SOUIT, S. **Orquestração de sistemas produtivos dispersos**. 2013. Biblioteca

Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3152/tde-26062014-110055/>>. Acesso em: 31 jul. 2017.

SOUIT, S.; FATTORI, C. C.; JUNQUEIRA, F.; SANTOS FILHO, D. J.; MIYAGI, P. E. Orchestrating dispersed productive systems. **IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA**, p. 1–4, 2013.

UNGUREAN, I.; GAITAN, N.-C.; GAITAN, V. G. An IoT architecture for things from industrial environment. **10th IEEE International Conference on Communications (COMM)**, 2014.

VAN KRANENBURG, R.; DODSON, S. **The internet of things : a critique of ambient technology and the all-seeing network of RFID**. [s.l.] Institute of Network Cultures, 2008.

VEIGA, G.; PIRES, J. N.; NILSSON, K. Experiments with service-oriented architectures for industrial robotic cells programming. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 25, n. 4–5, p. 746–755, 2009.

VISÃO. **Visão geral de clusters federados**. Disponível em: <<https://cloud.google.com/container-engine/docs/cluster-federation>>. Acesso em: 3 ago. 2017.

W3C Brasil - World Wide Web Consortium Escritório Brasil. Disponível em: <<http://www.w3c.br/Padroes/>>. Acesso em: 2 ago. 2017.

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

WANG, S.; SHEN, W.; HAO, Q. An agent-based Web service workflow model for inter-enterprise collaboration. **Expert Systems with Applications**, v. 31, n. 4, p. 787–799, 2006.

WANG, S.; WAN, J.; LI, D.; ZHANG, C. Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 12, n. 1, p. 10, 2016.

WANG, X. V.; XU, X. W. An interoperable solution for Cloud manufacturing. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 29, n. 4, p. 232–247, 2013.

WEYRICH, M.; EBERT, C. Reference architectures for the internet of things. **IEEE Software**, v. 33, n. 1, p. 112–116, 2016.

What is OPC? Disponível em: <<https://opcfoundation.org/about/what-is-opc/>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

WU, Z.; GAO, Z.; CAO, Y.; YE, X.; YANG, J. Tolerance Design and Adjustment of Complex Customized Product Based on Cloud Manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 27, p. 169–175, 2015.

XU, L. D.; HE, W.; LI, S. Internet of Things in Industries: A Survey. **IEEE Transactions**

on Industrial Informatics, v. 10, n. 4, p. 2233–2243, 2014.

XU, X. From cloud computing to cloud manufacturing. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 28, n. 1, p. 75–86, 2012.

YAN, Z.; KONG, N.; TIAN, Y.; PARK, Y.-J. A Universal Object Name Resolution Scheme for IoT. **2013 IEEE International Conference on Green Computing and Communications and IEEE Internet of Things and IEEE Cyber, Physical and Social Computing**, p. 1120–1124, 2013.

APÊNDICE A – Materiais e metodologia de pesquisa

A metodologia de pesquisa adotada para o desenvolvimento do trabalho foi baseada no método citado por Jensen (1992). Este método, conforme mostra a Figura 61, apresenta uma relação baseada na trilogia “teoria”, “ferramentas” e “aplicações”. Estes três aspectos formam um ciclo e estão integrados no processo de desenvolvimento de um método e contribuem sinergicamente nos processos associados a cada um deles.

Figura 61 – Metodologia para desenvolvimento da pesquisa.

Fonte: Jensen (1992).

De acordo com Melo (2011) esta é uma abordagem de engenharia que, considerando os aspectos formais associados à definição do modelo e dos métodos de análise aplicáveis, utiliza as aplicações como “motor” de desenvolvimento para ferramentas de suporte à aplicação do modelo. É uma fórmula plenamente bem sucedida do ponto de vista dos objetivos científicos, comprovada pelos inúmeros trabalhos desenvolvidos a partir da rede de Petri e das aplicações utilizando as ferramentas propostas.

A Figura 62 sintetiza as principais referências do presente trabalho em termos da trilogia proposta por Jensen (1992).

Figura 62 – Ciclo do desenvolvimento utilizado neste projeto de pesquisa.

Fonte: O autor.

Os recursos necessários para o desenvolvimento deste projeto são: computador para o desenvolvimento da aplicação; rede de computadores com servidor *Web* para disponibilizar os serviços na *Internet*; acesso às bases de dados (IEEE Xplore, Scopus Science Direct, SciELO, Web of Science) e outras fontes de pesquisa eletrônica; e, um conjunto de estações de trabalho que realizam tarefas e operações de fabricação mecânica para realizar os testes de integração e comunicação entre recursos do sistema produtivo (SP). O trabalho requer ainda um simulador de sistema produtivo disperso (SPD); etiquetas RFID (*Radio Frequency Identificaiton*) passivas, leitor e gravador RFID controlado por Arduino (como uma solução de baixo custo para as estações de trabalho que não possuem dispositivos RFID). Vale destacar que estes recursos, exceto o conjunto RFID, estão disponíveis no campus Lages do IFSC - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e também no Laboratório de Sistemas Automatizados do Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP).

Plano de Trabalho

Nesta seção são descritas as etapas executadas para a realização deste projeto.

Etapa 1 – Curso das disciplinas do programa de doutorado

Esta etapa contempla as disciplinas do curso de doutorado. Devem ser cursadas as disciplinas ofertadas pelo programa DINTER IFSC/USP (Doutorado Interinstitucional – Universidade de São Paulo / Instituto Federal de Santa Catarina) para cumprir o número de créditos necessários conforme a regulamentação vigente e para o levantamento de dados do projeto de pesquisa da tese de doutorado. As disciplinas cursadas e sua relação com a tese de doutorado são citadas a seguir:

a) Fundamentos do Projeto de Sistemas Mecânicos (PMR-5004⁴⁸): Esta disciplina aborda o projeto de sistemas mecânicos e as recomendações para o projeto dos mesmos. Esta disciplina está relacionada com a pesquisa de doutorado de uma forma indireta, no sentido de uma formação básica de conhecimentos e saberes dos elementos de máquinas envolvidos no projeto de sistemas mecânicos e, no contexto deste trabalho, torna-se essencial para a parte de projeto de plantas industriais, auxiliando na compreensão de equipamentos/máquinas envolvidas

b) Modelagem e Análise de Sistemas de Automação – Abordagem baseada em Redes de Petri (PMR-5023⁴⁹): Esta disciplina aborda a modelagem e análise de sistemas de automação – sistemas a eventos discretos (SED) – por meio de redes de Petri (RdP). Esta, por sua vez, contribui de forma mais direta com o tema da pesquisa. Como o objetivo é de uma proposta de uma arquitetura para a descoberta e seleção de equipamento para processar operações requisitadas em um sistema de manufatura, logo, é importante conhecer técnicas para identificar as demandas e para a modelagem e análise de sistemas de automação.

c) Termodinâmica Avançada I (PME-5014⁵⁰): A terceira disciplina, tratando-se de termodinâmica, teve também como propósito o domínio de conhecimentos fundamentais de uma das ciências básicas de Engenharia Mecânica consideradas no projeto de máquinas e sistemas mecânicos.

⁴⁸ PMR5004 – Fundamentos do Projeto de Sistemas Mecânicos (Professor Dr. Gilberto F. M. de Souza e Professor Dr. Tarcísio A. H. Coelho).

⁴⁹ PMR5023 – Modelagem e Análise de Sistemas de Automação – Abordagem Baseada em Redes de Petri (Professor Dr. Paulo Eigi Miyagi e Professor Dr. Fabrício Junqueira).

⁵⁰ PME5014 – Termodinâmica Avançada I (Professor Dr. Otávio de Mattos Silveiras).

d) Simulação de Sistemas Produtivos Automatizados (PMR-5024⁵¹): Esta disciplina priorizou uma abordagem prática sobre a modelagem e simulação com o uso da ferramenta ProModel⁵² para a simulação de sistemas a eventos discretos (SED).

As três primeiras disciplinas fizeram parte do nivelamento do programa DINTER e foram ministradas no Campus Florianópolis do IFSC. A quarta disciplina, cursada na EPUSP (Escola Politécnica da USP) foi definida juntamente com o professor orientador como suporte de conhecimento ao objeto de estudo da tese de doutorado.

Etapa 2 – Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica complementa os assuntos previamente tratados nas disciplinas e envolvidos no projeto de pesquisa. Caso necessário, novos estudos devem ser realizados de acordo com a necessidade⁵³. Inicialmente os seguintes assuntos foram abordados:

- CPS e IoT;
- Indústria 4.0;
- Sistemas produtivos;
- Manufatura baseada na computação em nuvem;
- Rede colaborativa de serviços e a identificação e localização de serviços por meio destas;
- Arquitetura SOA e WS;
- Comunicação por meio de sistema RFID.

Etapa 3 – Estado da arte

Nesta etapa são realizadas as pesquisas e levantamentos para identificar as principais lacunas no contexto da Indústria 4.0 com ênfase na comunicação dos recursos de manufatura, assim como a identificação de equipamentos que atendam as operações a serem executados em um SP.

⁵¹ PMR5024 – Simulação de Sistemas Produtivos Automatizados (Professor Dr. Fabrício Junqueira)

⁵² <http://www.belge.com.br/promodel.php>

⁵³ Com advento Indústria 4.0 o projeto passou a ter uma nova abordagem no que diz respeito a IoT e CPS, bem como a proposta da composição de serviços e a identificação dos mesmos para este meio.

Etapa 4 – Proposta da arquitetura para organização e descoberta de equipamentos

Esta etapa contempla a proposta da arquitetura baseada em uma rede de equipamentos estruturada hierarquicamente para descobrir e selecionar equipamentos nas células de um SP ou SPD para processar operações conforme os requisitos do produto.

Etapa 5 – Estudos de caso

Nesta etapa estudos de casos representativos para desenvolvimento e análise da arquitetura proposta devem ser identificados e utilizados para aprimoramento da proposta.

Etapa 6 – Validação dos resultados

A validação dos resultados se dará por meio de experimentos nos cenários de aplicação da arquitetura proposta.

Etapa 7 – Consolidação do documento de pesquisa

Durante esta etapa, que é paralela às demais, são consolidados na forma de textos os resultados da pesquisa, envolvendo desde o texto para o exame de qualificação até o documento referente à tese de doutorado.

No decorrer do doutorado, serão elaborados e submetidos artigos com resultados parciais para congressos científicos, de forma a ter uma realimentação da comunidade científica quanto à relevância/importância da pesquisa e detecção de lacunas que não foram percebidas e que necessitem ser exploradas.

Cronograma

A Tabela 39 apresenta o cronograma das atividades a serem desenvolvidas durante o período previsto para a realização do Doutorado. A mesma está dividida conforme as 7 (sete) etapas descritas anteriormente, seguido da etapa referente à proficiência da língua Inglesa. Tais etapas estão distribuídas no período de 4,5 anos, sendo que cada ano é dividido em 3 períodos de 4 meses cada, uniformizado com os períodos de oferta de disciplinas e atividades do programa de doutorado em Engenharia Mecânica da EPUSP.

Tabela 39 – Cronograma das atividades a serem desenvolvidas ao longo do programa de doutorado.

Etapas	Período													
	01/2013	02/2013	03/2013	01/2014	02/2014	03/2014	01/2015	02/2015	03/2015	01/2016	02/2016	03/2016	01/2017	02/2017
Etapa 1	X	X	X						X					
Etapa 2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Etapa 3				X	X	X	X	X	X	X	X			
Etapa 4						X	X	X	X	X	X			
Etapa 5							X	X	X	X	X	X	X	
Etapa 6									X	X	X	X	X	
Etapa 7							X	X	X	X	X	X	X	X
Proficiência Inglês ⁵⁴				X	X	X								

Período de afastamento integral

Legenda:			
X	Concluído	X	Requer revisões

⁵⁴ O período para proficiência na língua Inglesa contempla a fase de preparação até a realização e aprovação da mesma. A proficiência foi realizada no Centro de Línguas da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da USP (CLFFLCH).

APÊNDICE B – Publicações decorrentes da pesquisa

As publicações decorrentes desta pesquisa evidenciam a evolução do trabalho que resultaram em adaptações necessárias para atender os requisitos da arquitetura.

O artigo da Tabela 40 foi apresentado na conferência para doutorandos com pesquisas com foco em sistemas computacionais, elétricos e industriais. O artigo apresenta o levantamento bibliográfico em torno de conceitos da Indústria 4.0 e de modelos de referência de arquitetura para a IoT. A primeira proposta de arquitetura foi desenvolvida com base no IoT-ARM haja vista a forte relação da IoT com a Indústria 4.0. Neste artigo foram explorados ainda os benefícios da computação em nuvem para a Indústria 4.0 e também da composição de serviços *Web* baseado na tecnologia SOA para a integração de sistema heterogêneos.

Tabela 40 – Artigo apresentado no DoCEIS'2015.

Título	<i>Service Composition in the Cloud-Based Manufacturing Focused on the Industry 4.0</i>
Resumo	<i>The emerging Industry 4.0 concept, also called fourth industrial revolution and understood as smart factory, is based on integration of both Internet of Things and Cyber-Physical Systems. In smart factory, these two concepts are converging to the Internet of Services, which uses the cloud-based manufacturing for creating, publishing, and sharing the services that represent manufacturing processes, and could be offered by virtual enterprises. Therefore, any dispersed partner can meet the market demands according to their skills, capacities, and availability. This paper presents a survey about service composition in a cloud-based manufacturing over the Industry 4.0. To achieve it, the concepts and characteristics about the service composition based on cloud-manufacturing over the Industry 4.0 are presented, and then the advanced researches about it are summarized. After it, the main research challenges over these issues are shown. Finally, discussions on service composition are reported to contribute for the future researches.</i>
Palavras Chaves	<i>Cloud-based manufacturing, Cyber-physical systems, Industry 4.0, Internet of things, Service composition, Virtual enterprises.</i>
Evento/Periódico	<i>6th Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems – DoCEIS' 2015 – IFIP AICT, Caparica, Lisboa, Portugal, Vol. 450, p. 65-72.</i>
Ano	2015
DOI	10.1007/978-3-319-16766-4_7
Autores	Pisching, M.A., Junqueira, F., Santos Filho, D.J. and Miyagi, P.E.

A partir da proposta de arquitetura apresentada na Tabela 40, foi apresentado uma proposta de arquitetura para organizar e localizar serviços que pudessem atender os requisitos dos produtos baseados em serviços *Web*. A proposta, detalhada na Tabela 41, contém a essência da RHE e das tabelas TOE e TLE que foram otimizadas com o propósito de especificar a dinâmica da busca de um equipamento para processar as operações requisitadas pelo produto.

Tabela 41 – Artigo apresentado no COBEM 2015.

Título	<i>An Architecture for Organizing and Locating Services to the Industry 4.0</i>
Resumo	<i>Research and government agencies from Germany has been leading the fourth industrial revolution, also referred as Industry 4.0, a concept that have been gaining force and new followers around the world. The main purpose of this emergent concept is to consolidate the smart factory, to enable the creation of on-demand and personalized smart products and services that meet the consumers' individual needs. It is based-on Cyber-Physical Systems, and Internet of Things, which use resources of information and communication technology integrated to the shop floor. Amid global trends and market fluctuations, the Industry 4.0 may benefit industries regardless of size, but especially small- and medium-size enterprises and startups with regard to the establishment of virtual enterprises. However, recent studies show that between so many concerns about the Industry 4.0, stand out the needs for architectures, methods and standards to organize and locate services of virtual entities that can contribute to the performing of on demand services. This paper presents an architecture for organizing service in hierarchical structure and locating them on a system similar to Domain Name System, in a way to enable products to be treated according its needs. To achieve it, the fundamental concepts around the Industry 4.0 are presented and architectures are investigated, followed by an application sample based on a hypothetical engine factory.</i>
Palavras Chaves	<i>Cyber-Physical Systems, Hierarchical Service Organization, Industry 4.0, Internet of Things, Service Composition, Service Location.</i>
Evento/Periódico	<i>23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2015) – Rio de Janeiro, Brazil.</i>
Ano	2015
DOI	10.20906/CPS/COB-2015-0415
Autores	Pisching, M.A., Junqueira, F., Santos Filho, D.J. and Miyagi, P.E.

O artigo apresentado na Tabela 42 representa o marco da investigação do RAMI 4.0 como modelo de referência para o desenvolvimento deste projeto. A partir dos estudos realizados para o desenvolvimento deste artigo foi identificado o RAMI 4.0, promovendo a transição do modelo de referência que antes era o IoT-ARM. A transição ocorreu pelo motivo de que o RAMI 4.0 foi desenvolvido com ênfase na Indústria 4.0 e tem se mostrado mais próximo dos objetivos descritos neste trabalho.

Na Tabela 43 é mostrado o artigo apresentado no Congresso Brasileiro de Automática. Neste artigo é realizado um levantamento bibliográfico a respeito da modelagem e simulação de sistemas com foco na Indústria 4.0. O principal resultado deste artigo está nas abordagens para a modelagem e simulação de arquiteturas que veio a auxiliar para a escolha da técnica *Production Flow Schema*/Rede de Petri para o desenvolvimento desta tese de doutorado.

Tabela 42 – Artigo apresentado no ETFA 2016.

Título	<i>An Architecture based on IoT and CPS to Organize and Locate Services: An architecture focused on Industry 4.0</i>
Resumo	<i>The fourth Industrial Revolution, also called Industry 4.0 (I4.0), has been increasing the expectation around productive systems. It is a new concept that has been changing the view and the value chain of enterprises. The I4.0 comprise the smart factory, bringing the emerging concepts of Internet of Things (IoT) and cyber-physical system (CPS) into manufacturing processes in a way to enable the design and creation of smart products, procedures and processes. Although, this scenario needs more investigation by the research and development fields, especially for architectures to guide the I4.0 implementation, mainly because it is in an initial stage and requires a comprehensive understanding to become a consolidated environment. The overall aim of this research is the presentation of an architecture based on IoT and CPS focused on I4.0. The proposal is centered on a hierarchical organization of services to contribute to the communication between machines and products so that products can be automatically guided in the manufacturing processes.</i>
Palavras Chaves	<i>Cyber-Physical Systems; Industry 4.0; Internet of Things; Productive System; Smart Factory.</i>
Evento/Periódico	<i>21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE – Berlin, Germany.</i>
Ano	2016
DOI	10.1109/ETFA.2016.7733506
Autores	Pisching, M.A., Junqueira, F., Santos Filho, D.J. and Miyagi, P.E.

Tabela 43 – Artigo apresentado no CBA 2016 (a).

Título	<i>Architecture for industry 4.0: related issues about modelling and simulation</i>
Resumo	<i>The fourth industrial revolution, also called Industry 4.0, goes in favour of the consolidation of the smart factory by the creation of smart products, procedures and processes, in a way to offer on-demand personalized services that can meet the needs of individual consumers. It is based on high information and communication technology and the application of cyber-physical systems and the introduction of Internet of Things into the factory. To achieve it, one need of the Industry 4.0 is the communication between products and machines to drive the products during the manufacturing processes and enabling that it can receive personalized services. Although, concrete architectures and standardization for Industry 4.0 is a lack. The purpose of this paper is the presentation of a survey considering the issues about methods and approaches in modelling and simulation of architectures for Industry 4.0 in a way that it can guide the building of an architecture. The research takes into account the architecture design of software, CPS, and IoT, the concepts that are closely linked to Industry 4.0. Using a reference approach of modelling and simulation this paper show common issues about the design, including simulation, of architecture models that can be used in future research.</i>
Palavras Chaves	<i>Architecture; Cyber-Physical Systems; Internet of Things; Industry 4.0; Modelling and Simulation</i>
Evento/Periódico	<i>XXI Congresso Brasileiro de Automática (CBA2016) – Vitória/ES/Brasil.</i>
Ano	2016
Disponível em	https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/PROCEEDINGS/
Autores	Pisching, M.A., Junqueira, F., Santos Filho, D.J. and Miyagi, P.E.

Em virtude da forte relação da Internet das Coisas com a Indústria 4.0, o artigo relatado na Tabela 44 tratou da IoT em sistemas produtivos, visando identificar

tecnologias e prover uma solução para orientar sua aplicação em sistemas para a Indústria 4.0.

Tabela 44 – Artigo apresentado no CBA 2016 (b).

Título	Aplicação da internet das coisas em sistemas produtivos com foco na indústria 4.0
Resumo	Com a evolução das tecnologias de informação e comunicação e, principalmente, a ascensão da Internet, despontam dois novos conceitos para os sistemas produtivos: a Internet das Coisas e os Sistemas Ciber-Físicos, que propõem a integração de todos os elementos (atores, dispositivos, equipamentos, funcionalidades e serviços) dos sistemas produtivos compondo uma rede complexa de processamento de materiais e informações. A união dos diferentes conceitos envolvidos forma a base da quarta revolução industrial, também chamada de "Indústria 4.0" que revisa os meios de produção com as funcionalidades disponibilizadas pela tecnologia da informação e comunicação para gestão e controle da produção, possibilitando a comunicação entre produtos e máquinas e, com isso, prover soluções sob demanda de acordo com as especificidades do consumidor. Contudo, a implementação prática da Indústria 4.0 requer novas arquiteturas métodos de implantação como, por exemplo, para a comunicação entre produtos e máquinas de sistemas produtivos já existentes. Este artigo introduz assim um método para a aplicação do conceito de IoT numa linha produtiva envolvendo a interação entre peças, máquinas e controladores por meio de sensores de Identificação por Rádio Frequência e, aplicado a um Sistema Modular de Produção.
Palavras Chaves	Indústria 4.0; Internet das Coisas; Sistemas Ciber Físicos; Sistemas Produtivos.
Evento/Periódico	XXI Congresso Brasileiro de Automática (CBA2016) – Vitória/ES/Brasil.
Ano	2016
Disponível em	https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/PROCEEDINGS/
Autores	Sakurai, L.H., Pisching, M.A., Pessoa, M.A.O., Junqueira, F. e Miyagi, P.E.

O artigo mostrado na Tabela 45 tem o propósito de apresentar a proposta de uma arquitetura para o desenvolvimento de sistemas ciber-físicos. No artigo foi utilizado o sistema de produção modular da Festo, que contribuiu para a realização dos experimentos da aplicação sugerida nesta tese, além de apontar os recursos físicos necessários para a implementação dos mesmos.

Por fim, o artigo apresentado na Tabela 46 contempla a arquitetura proposta nesta tese, no qual é apresentada a modelagem conceitual e funcional por meio da técnica formal *Production Flow Schema (PFS)*/rede de Petri (RdP) utilizada para analisar e verificar os elementos que compõem a arquitetura. Também é apresentada uma aplicação da arquitetura no sistema de produção modular da Festo (tendo por base o artigo apresentado na Tabela 45) para avaliar o RAMI 4.0 como um guia para o desenvolvimento de arquiteturas para a Indústria 4.0.

Tabela 45 – Artigo apresentado no SBAI 2017.

Título	Arquitetura para desenvolvimento de sistemas ciber-físicos aplicados na indústria 4.0
Resumo	A Indústria 4.0 tem sido descrita como o próximo modelo industrial. Para que possa ser de fato implementada em sistemas reais, há necessidade de se estruturar os sistemas de controle e gestão dos processos envolvidos, o que, segundo diversos autores, será realizado pelos Sistemas Ciber-Físicos (CPS) e pela Internet das Coisas (IoT). Nesse contexto, no presente artigo analisa-se algumas propostas de arquiteturas de CPS para a Indústria 4.0 e propõe-se uma nova arquitetura com foco no atendimento dos requisitos dessa nova era industrial. Para verificar a aplicabilidade da proposta, a arquitetura foi aplicada em um sistema modular de produção.
Palavras Chaves	Indústria 4.0; Internet das Coisas; Sistemas Ciber Físicos.
Evento/Periódico	Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2017) – Porto Alegre/RS/Brasil.
Ano	2017
Autores	Pisching, M.A., Tasca, A.A., Pessoa, M.A.O., Junqueira, F. e Miyagi, P.E.

Tabela 46 – Artigo publicado na revista *Computers & Industrial Engineering*.

Título	<i>An architecture based on rami 4.0 to discover equipment to process operations required by products</i>
Resumo	<i>The fourth industrial revolution, also called Industry 4.0, is a new industrial age that have been gaining force and new followers around the world. The Industry 4.0 can be understood as the implementation of the smart factory to provide smart products and services that meet the consumer individual needs. Given its increasing acceptance and repercussion, a reference architecture model for Industry 4.0 (RAMI 4.0) was developed based on vertical integration, horizontal integration and end-to-end engineering. However, RAMI 4.0 initiative requires efforts in different aspects to reach the level of practical implementation. In this sense, this paper aims to present a layered architecture based on RAMI 4.0 to discover equipment to process operations according to the product requirements. The architecture must provide components for a communication between machines and products, and a service that offer a mechanism similar to the domain name system (DNS) to search the equipment to process the operation. In this architecture the equipment are storage in a structure organized hierarchically to assist the search service. The functionalities of the proposed architecture are conceptually modeled using production flow schema (PFS) and their dynamic behaviors are verified and validated by Petri net (PN) models. The architecture is applied in a modular production system to evaluate RAMI 4.0 as a guide for the development of architectures for Industry 4.0.</i>
Palavras Chaves	<i>Industry 4.0, Petri Net, Production Flow Schema, RAMI 4.0.</i>
Evento/Periódico	<i>Journal of Computers & Industrial Engineering</i>
Ano	2017
Autores	Pisching, M.A., Pessoa, M.A.O., Junqueira, F., Santo Filho, D.J. e Miyagi, P.E.

APÊNDICE C – Arquitetura e modelo de referência de arquitetura

Considerando que a arquitetura proposta nesta tese é baseada no RAMI 4.0 (*Reference Architectural Model for Industry 4.0* – Modelo de Arquitetura de Referência para Indústria 4.0) e está centrada no domínio de arquitetura de *software*. Dado o propósito do trabalho, neste apêndice é explanado o conceito de arquitetura com foco em *software* e realizada uma abordagem sobre modelos de referência de arquitetura.

De modo geral a arquitetura de um sistema, inclusive de *software*, constitui um *framework* (esquema) abrangente que descreve sua forma e estrutura, seus componentes e como eles se integram. Pressman e Maxim (2016, p.254), definem arquitetura de *software* como: “A arquitetura de *software* de um programa ou sistema computacional é a estrutura, ou estruturas, do sistema, o que abrange os componentes de *software*, as propriedades externamente visíveis desses componentes e as relações entre eles”.

Já os modelos de arquiteturas podem ser aplicados ao projeto de outros sistemas e representam um conjunto de abstrações que permitem descrever arquiteturas de modo previsível (PRESSMAN; MAXIM, 2016). Os modelos de arquiteturas podem ser classificados como modelos de referência. Esses modelos são mais abstratos e descrevem uma classe maior de sistemas (SOMMERVILLE, 2015). As arquiteturas de referência não são geralmente consideradas um roteiro de implementação, e sim um meio de discussão de arquiteturas de domínio específico e de comparação de sistemas diferentes em um domínio. Elas atuam como uma base em relação à qual os sistemas podem ser avaliados e projetados. Quando se tem um modelo de referência esse pode ser aplicado em muitas classes de aplicações (SOMMERVILLE, 2015).

No livro “*Enabling Things to Talk*” (BASSI et al., 2013, p. 15, tradução nossa), publicado pela *Springer* como resultado do IoT-A *project* que desenvolveu o IoT-ARM (*Internet of Things – Architecture Reference Model*) destaca:

Por modelo de referência entendemos uma estrutura abstrata que compreende um conjunto mínimo de conceitos unificadores, axiomas e relações para a compreensão das relações significativas entre as entidades de um ambiente. Essa estrutura deve permitir o desenvolvimento de arquiteturas específicas que podem ter diferentes níveis de abstração. Neste nível de abstração somos independentes de padrões específicos, tecnologias, implementações ou outros detalhes concretos[...].

[...] O IoT-ARM fornece exatamente essa base para o campo da IoT.

No mesmo livro os autores descrevem o uso do IoT-ARM como base para implementação de arquiteturas **concretas** (páginas 18 e 19): “Isto é realizado provendo boas práticas e um guia para a conversão do IoT-ARM em arquiteturas concretas”. No livro de Bassi et al. (2013, p. 15, tradução nossa) são definidos os conceitos de modelo de referência (*Reference Model*), arquitetura de referência (*Reference Architecture*) e arquitetura concreta (*Concrete Architecture*).

Modelos de referência e arquiteturas de referência fornecem uma descrição que é mais abstrata daquilo que é inerente a sistemas e aplicações reais. São mais abstratas do que arquiteturas concretas que foram projetadas para uma aplicação particular com limitações e escolhas particulares [...]. As arquiteturas ajudam na concepção, engenharia, construção e testes de sistemas reais [...]. A estrutura da arquitetura pode ser explicitada através de uma descrição de arquitetura, ou está implícita através do próprio sistema. A extração de componentes essenciais de arquiteturas existentes, como mecanismos ou o uso de normas, permite a definição de uma arquitetura de referência. As diretrizes podem ser vinculadas a uma arquitetura de referência para derivar arquiteturas concretas da arquitetura de referência.

O conteúdo do referido livro, que envolveu mais de 50 autores, vai ao encontro de outros modelos de referência na área da computação, como por exemplo o modelo de referência OSI para arquiteturas de computadores, que serve como base para a criação de arquiteturas e implementação de sistemas de comunicação em rede.

Sobre o RAMI 4.0, o entendimento que se tem é que se trata de um modelo de referência de arquitetura, em um nível de abstração mais alto. Por isso o mesmo pode ser utilizado como base para a criação de arquiteturas “concretas” aplicadas a Indústria 4.0 (ou seja, uma arquitetura com fins específicos baseado num modelo de referência) e também como guia para a implementação da Indústria 4.0 seguindo normas já existentes.

O próprio RAMI 4.0 é uma extensão do modelo de referência SGAM (*Smart Grid Architecture Model*) (ADOLPH et al., 2016, p. 32). A respeito da criação de arquitetura baseada em um modelo de referência, Fleischmann; Kohl e Franke (2016) propõem uma arquitetura que envolve o ser humano como parte de um sistema. O objetivo do trabalho dos autores é a proposta de uma arquitetura baseado em RAMI 4.0 para o monitoramento de condições do sistema produtivo.(FLEISCHMANN; KOHL; FRANKE, 2016). A proposta da arquitetura é apresentada na Figura 63.

Figura 63 – Ilustração de uma arquitetura baseada em RAMI 4.0.

Fonte: Fleischmann; Kohl e Franke (2016).

Essas colocações servem de coordenadas para a definição do tema dessa pesquisa, isto é, o desenvolvimento de uma arquitetura baseada no modelo de referência de arquitetura para Indústria 4.0.

APÊNDICE D – Arquitetura baseada em modelos de referência para IoT

Tendo por base o cenário global da I4.0 (da Figura 6 até a Figura 10), neste Apêndice é apresentada a proposta inicial da arquitetura que dá suporte à localização de serviços e a organização hierárquica da rede colaborativa de serviços com base no IoT-ARM. O foco deste texto é o problema de resolver serviços no chão de fábrica que devem ser organizados previamente usando tecnologias baseadas na arquitetura SOA, para assim auxiliar no controle da orientação do produto durante o processo produtivo por meio da comunicação entre produto e máquina.

Arquitetura para suporte à organização hierárquica e localização de EV

A arquitetura básica proposta neste trabalho é mostrada na Figura 64. Ela tem por base as camadas de ‘**Aplicação**’, ‘**Comunicação**’ e ‘**Dispositivo**’ do IoT-ARM (Figura 17). A camada ‘**Entidades e Serviços em Nuvem**’ é responsável pela localização de uma entidade para executar um determinado tipo de serviço dado os parâmetros obtidos de uma peça/produto presente em um processo produtivo.

Figura 64 – Arquitetura Básica para a localização e resolução de serviços IoT.

Fonte: Adaptado de Pisching et al. (2015b).

Para a localização da entidade a executar um determinado serviço, a camada 3 é subdividida em subcamadas, conforme a ilustração na Figura 65. Comparado ao modelo de referência (Figura 17) sugerido por Bauer et al. (2013b), nota-se a presença de 3 módulos, denominados **GS**, **OFEVS** e **SLEVS** que são detalhados a seguir juntamente com os demais módulos:

Figura 65 – Expansão da camada Entidades e Serviços em Nuvem (ESN) apresentando as subcamadas para a localização de serviços nas entidades virtuais.

Fonte: Adaptado de Bauer et al. (2013b).

- **EV** – Entidades Virtuais – trata-se da representação virtual das entidades (“coisas”) físicas, tais como peças, produtos, robôs, esteiras, estampadoras, células de manufatura, etc. Cada **EV** tem seus atributos e métodos (serviços). Esta camada deve oferecer funções para manter e atualizar os dados da **EV**, de modo que a **EV** seja reflexo da sua situação física e vice versa;
- **GS** – Gerenciador de Serviço – é a interface de aplicação que deve oferecer recursos para a composição de serviços baseadas em RCS. A composição pode ser realizada por intermédio de operadores ou sistemas autônomos e baseados na SOA, como resultado do projeto de plantas industriais organizados de forma hierárquica e

federada. Isso significa que cada setor da indústria deve ser organizado como um domínio e dentro de cada um destes devem estar os equipamentos e máquinas, assim como os serviços que cada um pode executar de modo a permitir a execução de uma tarefa completa em um setor produtivo;

- **OFEVS** – Organização Federada de Entidades Virtuais e Serviços – tem a função de armazenar e prover informações sobre as entidades virtuais e serviços oferecidos por elas (Figura 66). Estas informações devem ser mantidas de forma hierárquica, permitindo a localização de recursos que possam atender a uma demanda específica ou sequência de operações num sistema de busca em árvore, similar ao que o ocorre no DNS (a dinâmica e os detalhes da organização hierárquica são apresentados na subseção “Organização Hierárquica da Rede Colaborativa de Serviços” deste Apêndice). A organização hierárquica é formada por entidades pertencentes a uma RCS, ou seja, entidades que estão presentes na empresa e no seu grupo de parceiros;

Figura 66 – Organização hierárquica presente na **OFEVS**.

Fonte: Pisching et al. (2015b).

- **SLEVS** – Serviço de Localização de Entidades Virtuais do Serviço – tem a função de atender os requisitos originados do ambiente de comunicação entre o sistema IoT e os dispositivos. Com base em parâmetros fornecidos por peças/produtos,

assim como o tipo de serviço a ser executado, esta camada interage com o **OFEVS** de modo a encontrar uma entidade capaz de executar tal serviço. Uma vez realizada esta ação, o **OFEVS** retorna o identificador da **EV**, que é localizada e requisitada a executar o serviço por intermédio da camada Serviço IoT;

- **Serviço IoT** – corresponde à interface de serviços IoT, entre eles destaca-se o **SLEVS**. Com o serviço já identificado, esta camada tem a função de fazer a interface com os elementos de comunicação para enviar e receber os comandos e ações para os dispositivos que devem executar os serviços.

Organização Hierárquica da Rede Colaborativa de Serviços

A organização hierárquica é mantida na **OFEVS** e tem por objetivo oferecer elementos para um serviço de localização de entidade que possa executar uma determinada tarefa sob demanda e de forma autônoma. A organização hierárquica é fornecida pela **SLEVS**. A **SLEVS** e a **OFEVS** têm a função de auxiliar no controle do fluxo operacional do sistema produtivo. Para fazer a localização do serviço é utilizado um mecanismo de busca similar ao DNS e as informações armazenadas em uma estrutura baseada em árvore de busca, onde cada nó representa uma entidade virtual (**EV**) e seus serviços. No mesmo cenário, um conjunto de elementos (nós) compreendem um segmento com capacidade de executar uma tarefa completa, por exemplo uma célula de manufatura. Para a localização, é dada a referência inicial do serviço a ser executado, para então resolver qual equipamento/máquina ou processo é capaz de atender a tal demanda em uma RCS, ou seja, executar a função de localização de domínios e subdomínios com seus respectivos serviços.

A RCS representa cadeias de sistemas produtivos, sejam elas locais ou dispersas. Com o propósito de organizar as **EVs** e suas capacidades representando situações do mundo real, elas são organizadas de acordo com as divisões e subdivisões de sistemas produtivos, partindo de setores até equipamentos e máquinas presentes em cada ambiente, como se fossem domínios e subdomínios de redes de computadores cada qual com seus recursos. Cada unidade é composta por equipamentos que podem fazer parte de uma estrutura organizacional compartilhada para prover serviços a terceiros assim como obter colaboração de outras partes interessadas. A representação desta hierarquia organizacional é apresentada na Figura 67, a qual é dividida nos níveis SSC (Servidor de Serviço Central), MS (Macro Serviço), MeS (Meso Serviço) e mS (micro Serviço). O SSC é a raiz da hierarquia, que

é capaz de reconhecer todas as **EVs** e serviços subjacentes. No nível logo abaixo ao SSC estão localizados os domínios principais denominados MS com seus subdomínios MeS e mS, formando assim 4 níveis para a localização de serviços. Neste caso o MS corresponde a empresas ou organizações virtuais capazes de atender algum tipo de serviço de acordo com suas especificidades, por exemplo, uma empresa de logística, uma fábrica de motores, uma fábrica de pistões, uma fábrica de amortecedores, etc.

Na Figura 67 cada domínio é composto por subdomínios que correspondem aos MeS, que neste caso são os setores do sistema produtivo, como por exemplo células de manufatura. Este nível é seguido de subdivisões que correspondem a outros MeS (subdivisões dos setores) ou a mS que correspondem a máquinas, equipamentos e recursos (micro Serviços - mS) de chão de fábrica, capazes de executar os serviços (processos) físicos. Logo, a hierarquia e suas subdivisões correspondem a sequência de passos de linhas de produção para manufaturar produtos assim como os equipamentos que executam as tarefas, que neste caso, é compreendido como os serviços a serem executados fisicamente para transformar a matéria prima em produto, ao tempo que as operações executadas por estas também podem ser acompanhadas por meio de ambientes virtuais.

O sistema de localização, como mencionado anteriormente, é similar ao DNS, portanto, na composição da árvore hierárquica de EV e Serviços, cada nó é configurado com os serviços e suas capacidades, assim como com a identificação e capacidade de cada nó subjacente. Para isso são utilizadas duas tabelas, uma para manter as informações referente aos serviços e capacidades do nó corrente (Tabela 1 da Figura 68) e outra para manter as informações que orientam a localização de serviços em nós subjacentes (Tabela 2 da Figura 68), bem como, daqueles pertencentes a outros segmentos que porventura já tenham sido pesquisados e utilizados em outras situações, para assim, também agilizar as buscas na rede colaborativa de serviços. A primeira tabela é utilizada sempre em primeiro lugar, ou seja, quando uma peça ou produto traz a informação referente à demanda de um serviço, é verificada a capacidade da EV corrente de executar a tarefa. A segunda tabela é pesquisada em um segundo momento, para verificar se alguma entidade subjacente à corrente possui a capacidade (assim como a disponibilidade). Caso nenhuma EV subjacente possa atender a demanda, então é necessário recorrer a outras EVs pertencentes à árvore hierárquica, a começar sempre pela EV que estiver

logo acima da EV corrente, fazendo uma busca recursiva em seus nós até que uma EV capaz de executar o serviço possa ser encontrada. Quando não encontrar a solução, em última instância se recorre ao SSC que tem conhecimento de todas as EVs capazes de executar uma tarefa diante do contexto demandado. A primeira coluna da tabela 2 apresentada na Figura 68 corresponde à identificação do serviço, seguido do nível referente ao serviço, podendo este ser executado por uma EV macro, meso ou micro. A terceira coluna trata da identificação da EV, que é elemento chave para verificar sua capacidade e disponibilidade para executar a tarefa. Por fim, a quarta coluna trata da prioridade que a EV apresenta sobre outras para executar uma determinada tarefa.

Figura 67 – Organização Hierárquica das Entidades Digitalizadas.

Fonte: O autor.

Figura 68 – Representação das tabelas para localização de Entidades Digitalizadas.

Fonte: Pisching et al. (2015b).