

Henrique Abrantes Vitoi

**Arquitetura orientada a serviços baseada no RAMI4.0
para o compartilhamento da memória digital do produto
ao longo da cadeia de suprimentos**

São Paulo
2020

Henrique Abrantes Vitoi

**Arquitetura orientada a serviços baseada no RAMI4.0
para o compartilhamento da memória digital do produto
ao longo da cadeia de suprimentos**

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

Área de Concentração:
Engenharia de Controle e Automação Mecâ-
nica

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Junqueira
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi

São Paulo
2020

Ficha catalográfica

Henrique Abrantes Vitoi

**Arquitetura orientada a serviços baseada no RAMI4.0
para o compartilhamento da memória digital do produto
ao longo da cadeia de suprimentos**

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

Trabalho aprovado. São Paulo, 31 de dezembro de 2020:

Prof. Dr. Fabrício Junqueira
Orientador

Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi
Coorientador

Professor
Convidado 1

Professor
Convidado 2

São Paulo
2020

Resumo

A mudança de paradigma na indústria referente às recentes modificações em relação às tecnologias de manufatura é chamada de Indústria 4.0 (I4.0). Nesse novo conceito, redes inteligentes de máquinas e processos para indústria com o respaldo de Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) passam a proporcionar um alto nível de automação e intercâmbio de informações entre equipamentos, produtos e demais atores em um ambiente de manufatura. Este trabalho aborda uma proposta de desenvolvimento dos detalhes do Modelo de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0 (RAMI4.0), especificamente por meio da introdução do conceito de Memória Digital do Produto (MDP) ao eixo horizontal “Ciclo de Vida e Cadeia de Valor”, de forma a se aperfeiçoar a elaboração dessa arquitetura, proporcionando mais robustez ao modelo para uma futura adoção generalizada por parte de empresas por todo o mundo. O estudo aborda uma nova estrutura de compartilhamento da MDP do ativo por meio de *Web Services* composta por quatro elos: O Componente I4.0, o Repositório, a MDP e o Cliente. A proposta de estrutura é tratada com base no RAMI4.0 e visa propiciar o surgimento de novos cenários de criação de valor no contexto da I4.0 e incentivar a geração de novos modelos de negócio baseado em dados.

Palavras-chave: Indústria 4.0. RAMI4.0. Memória digital do produto. Arquitetura Orientada a Serviços (SOA). Cadeia de Suprimentos.

Abstract

This is the english abstract.

Keywords: Industry 4.0. RAMI4.0. Digital product memory. Value Chain. Product life cycle.

Listas de ilustrações

Figura 1 – As revoluções industriais.	18
Figura 2 – Representação do RAMI4.0.	20
Figura 3 – Temas-chave de pesquisa e desenvolvimento em I4.0.	22
Figura 4 – Metodologia de pesquisa utilizada.	25
Figura 5 – Teorias, ferramentas e aplicações apontadas em diferentes fases do projeto de pesquisa.	26
Figura 6 – Evolução da indústria por meio das revoluções industriais.	28
Figura 7 – Transição do (a) modelo hierárquico tradicional para o (b) modelo flexível de comunicação entre dispositivos na Indústria 4.0.	29
Figura 8 – Avanços tecnológicos que moldam a I4.0.	30
Figura 9 – (a) Representação completa do RAMI4.0 e (b) detalhamento de cada elemento do eixo “Camadas”.	32
Figura 10 – (a) Representação completa do RAMI4.0 e (b) detalhamento do eixo “Ciclo de Vida e Cadeia de Valor”.	33
Figura 11 – (a) Representação completa do RAMI4.0 e (b) detalhamento do eixo “Níveis Hierárquicos do RAMI4.0”.	34
Figura 12 – Representação do AAS como a parte virtual do Componente I4.0.	36
Figura 13 – Exemplificação de um AAS para um servomotor, incluindo os submodelos de identificação, dados técnicos, dados operacionais e documentação.	36
Figura 14 – Comunicação entre AASs de componentes I4.0.	37
Figura 15 – Detalhamento de funções no AAS por meio de submodelos.	38
Figura 16 – Exemplo de cadeia de suprimentos estendida.	39
Figura 17 – Cadeia de valor de Porter.	40
Figura 18 – Estágios do ciclo de vida do produto.	42
Figura 19 – Modelo de ciclo de vida do produto com renovação do produto.	43
Figura 20 – Coleta de dados do produto ao longo da cadeia de valores.	44
Figura 21 – Interconexão entre os elementos do sistema (a) com um <i>middleware</i> e (b) sem um <i>middleware</i> .	46
Figura 22 – Componentes de um WS e operações.	47
Figura 23 – Diagrama UML com os atores e interações em um WS.	48
Figura 24 – Elementos do PFS.	51
Figura 25 – Tipos de fluxo no PFS.	52
Figura 26 – Componentes e operações do WS.	54
Figura 27 – Diagrama PFS das operações do WS.	56
Figura 28 – Estrutura do AAS com seus submodelos e a MDP.	60

Figura 29 – Exemplificação das operações de publicação e busca com múltiplos clientes.	62
Figura 30 – Exemplificação das operações de publicação e busca com múltiplos produtos.	63
Figura 31 – Camadas do RAMI4.0 com os elementos da arquitetura.	67
Figura 32 – Diagrama PFS da operação de publicação.	68
Figura 33 – Diagrama PFS da requisição em uma operação de busca.	69
Figura 34 – Diagrama PFS da resposta em uma operação de busca.	71
Figura 35 – Diagrama PFS da requisição de um serviço em uma operação de interação. .	72
Figura 36 – Diagrama PFS da resposta de um serviço em uma operação de interação.	74
Figura 37 – Ciclo de vida do produto.	78

Lista de tabelas

Tabela 1 – Princípios para implantação da I4.0 baseados em Hermann, Pentek e Otto (2016)	28
Tabela 2 – Eixos do RAMI4.0	32
Tabela 3 – Possíveis operações em um <i>RESTful Service</i>	49
Tabela 4 – Componentes da arquitetura para a I4.0.	54
Tabela 5 – Operações do WS para a I4.0.	55
Tabela 6 – Proposta de metamodelo para a MDP do repositório.	58
Tabela 7 – Proposta de metamodelo para a MDP do servidor.	59
Tabela 8 – Cronograma detalhado de atividades em 2018 e 2019.	83
Tabela 9 – Cronograma detalhado planejado para 2020.	83

Listas de abreviaturas e siglas

AAS	<i>Asset Administration Shell</i> (Casca Administrativa do Ativo)
API	<i>Application Programming Interface</i> (Interface de Programação de Aplicação)
BD	Banco de Dados
BI	<i>Business Intelligence</i> (Inteligência Empresarial)
CS	Cadeia de Suprimentos
CV	Cadeia de Valor
CVP	Ciclo de Vida do Produto
GCVP	Gestão do Ciclo de Vida do Produto
GI	Gestão da Informação
I4.0	Indústria 4.0
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i> (Internet das Coisas Industrial)
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
MDP	Memória Digital do Produto
MFG	<i>Mark Flow Graph</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i> (Interconexão Aberta de Sistemas)
PFS	<i>Production Flow Schema</i> (Esquema de Fluxo de Produção)
QoS	<i>Quality of Service</i> (Qualidade de Serviço)
RAMI4.0	<i>Reference Architectural Model Industrie 4.0</i> (Modelo de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0)
REST	<i>Representational State Transfer</i> (Transferência Representacional de Estado)
RFID	(<i>Radio-Frequency IDentification</i>) (Identificação por Radiofrequência)
SOA	<i>Service Oriented Architecture</i> (Arquitetura Orientada a Serviços)
SED	Sistemas a eventos discretos

TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
UUID	<i>Universal Unique IDentifier</i> (Identificador Único Universal)
WS	<i>Web Service</i> (Serviço Web)
WSD	<i>Web Services Description</i> (Descrição do Serviço Web)
WSDL	<i>Web Services Description Language</i> (Linguagem de Descrição de Serviços Web)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Integração da MDP ao RAMI4.0	20
1.2	Objetivos	21
1.3	Estrutura do trabalho	23
2	METODOLOGIA	25
3	FUNDAMENTOS	27
3.1	Indústria 4.0	27
3.1.1	Modelo de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0	31
3.1.2	Asset Administration Shell	35
3.2	Logística & Cadeia de Suprimentos	38
3.2.1	Logística 4.0	40
3.3	Ciclo de vida do produto	41
3.4	Memória digital do produto	43
3.5	Arquitetura orientada a serviços	45
3.5.1	Web Services	46
3.5.2	Transferência Representacional de Estado	49
3.6	Modelagem de sistemas	49
3.6.1	Production Flow Schema	50
4	ARQUITETURA PARA COMPARTILHAMENTO DE INFORMAÇÕES DO ATIVO	53
4.1	Componentes e operações de serviços dos AASs	53
4.1.1	Componentes	53
4.1.2	Operações	55
4.2	Estrutura do AAS	56
4.2.1	Integração da MDP ao AAS	57
4.2.2	Detalhamento das partes do AAS	58
4.3	Fluxo de fornecimento de serviços	60
4.4	Mapeamento das operações no RAMI4.0	63
4.4.1	Descrição das camadas do RAMI4.0	64
4.4.2	Operação de Publicação	68
4.4.3	Operação de Busca	69
4.4.4	Operação de Interação	72

5	O CICLO DE VIDA DO PRODUTO NA I4.0	77
5.1	Ciclo de vida do produto no RAMI4.0	77
5.2	Modelos de negócio orientados por dados	78
5.2.1	Desenvolvimento do produto orientado por dados	78
5.2.2	Manutenção do produto orientada por dados	78
6	PUBLICAÇÕES DECORRENTES DO TRABALHO	81
7	CRONOGRAMA DE ATIVIDADES	83
8	CONCLUSÃO	85
	REFERÊNCIAS	87

1 Introdução

O cenário atual de comércio em um mundo intrinsecamente globalizado requer eficiência em troca de informações, serviços e mercadorias; ou seja, eficiência logística. A logística contribui para que pessoas não mais sejam obrigadas a viver perto das fontes de produção e possam trocar informações e mercadorias com outras regiões de forma efetiva, contribuindo decisivamente para melhorar o padrão econômico de vida geral.

A logística moderna envolve primariamente o compartilhamento de dados. A logística da informação lida com o fluxo de informações entre humanos e/ou máquinas dentro ou entre organizações ([HAFTOR; KAJTAZI, 2009](#)), que se agrupam formando uma rede de criação de valor por meio de informações.

A Memória Digital do Produto (MDP) é um conceito que se refere a sistemas que permitem a coleta de dados em todas as fases do ciclo de vida do produto para distribuição e/ou análise ([WAHLSTER, 2007](#)). Os dados de interesse do produto podem ser relativos a qualquer fase do produto ao longo de sua cadeia de valor, o que abrange dados de produção individual, de montagem, de distribuição, de uso por parte do consumidor, etc.

A manutenção da MDP permite o compartilhamento de informações do produto ao longo de sua cadeia de suprimentos, fornecendo dados importantes ao fabricante a fim de se aprimorar o desenvolvimento de novas versões do próprio produto. O compartilhamento de informações funciona também como um elo permanente entre o fornecedor e o cliente no pós-venda, permitindo assim que o produto mantenha atualizações de *software* e quaisquer outras melhorias instantaneamente.

O produto que contém uma memória digital alimentada por meio de sistemas que permitem a coleta de dados em todas as fases do ciclo de vida do produto pode armazenar estas informações e as distribuir para análise ([LASI et al., 2014](#)). Isso abrange dados de produção, montagem, distribuição (transporte) ([BRANDHERM; KRONER, 2011](#)), padrões de uso pelo cliente final, etc.

Tais dados, aliados a técnicas de Inteligência Empresarial (*Business Intelligence – BI*) para análise de dados, podem fornecer informações a serem retroalimentadas na fase de desenvolvimento do produto como forma de identificar pontos de melhorias para o desenvolvimento de novas versões do mesmo produto.

Tais conceitos de compartilhamento de informações de produtos por meio da MDP se encaixam na proposta da Indústria 4.0 (I4.0), que tem como fundamentos a inserção de novas tecnologias com o propósito de se oferecer um alto nível de automação e intercâmbio de informações entre equipamentos e produtos ([LASI et al., 2014](#)).

Portanto, surge na I4.0 oportunidades para a criação de novas soluções centradas no amplo compartilhamento de informações ao longo da cadeia de suprimentos, além de novas metodologias para a extração e análise dessas informações para desenvolvimento de

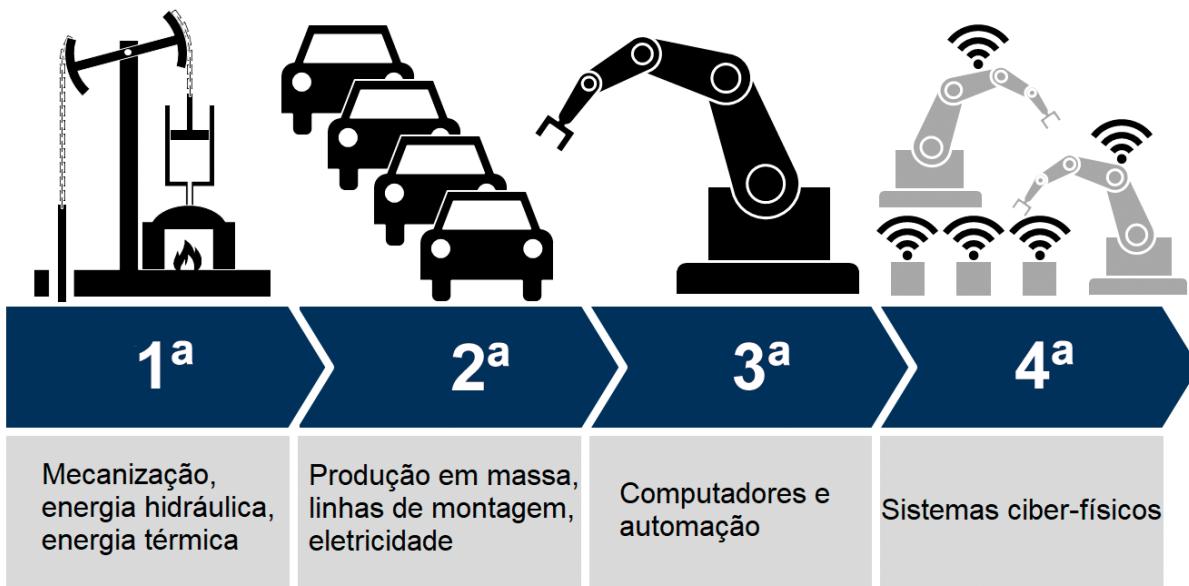
outros produtos aperfeiçoados.

A Logística da Informação e, consequentemente, a MDP são intrinsecamente relacionados à I4.0, que por sua vez faz o uso extensivo de conhecimentos e técnicas das área de Gestão da Informação (GI) e Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC).

A Indústria 4.0 surgiu a partir da crescente integração das Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) às cadeias de valor industriais, criando as bases para a próxima revolução industrial (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016). Essa mudança de paradigma na indústria se refere às recentes modificações em relação às tecnologias de manufatura, que passam a proporcionar um alto nível de automação e intercâmbio de informações entre equipamentos, produtos e demais atores em um ambiente de manufatura (LASI et al., 2014).

O nome Indústria 4.0 (I4.0) se dá ao fato de ser considerada a quarta maior revolução com relação à tecnologia de produção industrial, sendo as “revoluções industriais” consideradas evoluções tecnológicas que levaram a grandes mudanças no paradigma de produção, tal histórico de revoluções no campo da indústria é ilustrado na [Figura 1](#).

Figura 1 – As revoluções industriais.



Fonte: [Lasi et al. \(2014\)](#) (adaptado).

Tais modificações na indústria são essenciais devido às novas necessidades da própria indústria e às mudanças de padrões de consumo do mercado. Isto acarreta transformações no cenário operacional destas indústrias. Algumas das causas dessas mudanças operacionais são (LASI et al., 2014):

- Períodos de desenvolvimento curtos: Os períodos de desenvolvimento e inovação de produtos estão sendo reduzidos. A alta capacidade de inovação está se tornando um fator de sucesso para muitas empresas (*Time to market*);

- Individualização sob demanda: Os compradores passam a definir as condições de compra. Essa tendência leva a uma crescente individualização de produtos com características altamente personalizadas e, em casos extremos, a produtos individuais;
- Flexibilidade: Devido à individualização sob demanda, novas estruturas e organizações na indústria são essenciais para a fabricação de produtos com alto grau de personalização. É necessária uma maior flexibilidade no desenvolvimento do produto, especialmente na produção;
- Descentralização: Para lidar com condições específicas de cada produto, são necessários procedimentos mais rápidos de tomada de decisão. Para isso, as hierarquias organizacionais precisam ser reduzidas, dando ao produto maior independência sobre seu próprio processo de fabricação;
- Eficiência de recursos: A maior eficiência sobre o uso dos recursos sempre é algo desejável, porém sua importância se intensifica com as tendências de aumento dos preços dos recursos, bem como a mudança social no contexto de aspectos ecológicos. Isto exige um foco mais intensivo em sustentabilidade, o que decorre em uma maior racionalidade (ou eficiência) na utilização dos recursos.

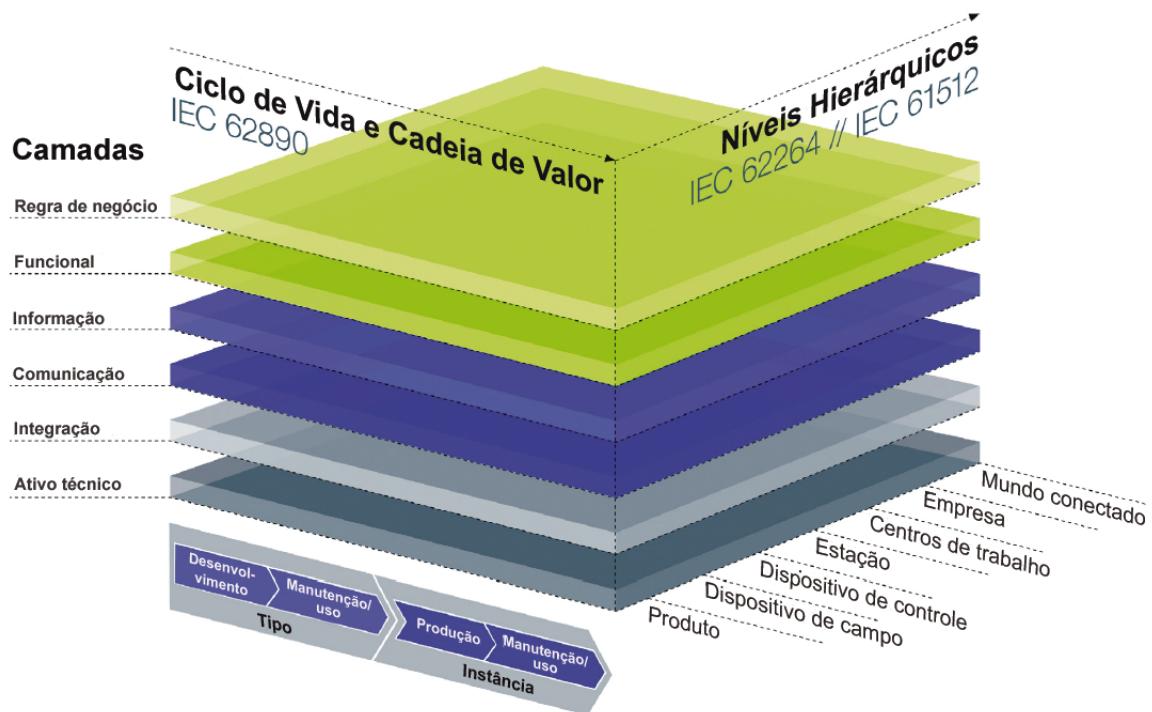
[Hermann, Pentek e Otto \(2016\)](#) elencam alguns princípios para I4.0 que devem ser considerados para o projeto de implementação de soluções I4.0, são eles: interoperabilidade, transparência de informação, descentralização de decisões e assistência técnica.

Estes princípios são diretrizes para o desenvolvimento de arquiteturas para a I4.0. As arquiteturas surgem com a necessidade de se definir padrões para a implantação de um sistema. Por ser um assunto novo, as arquiteturas de sistemas produtivos voltadas para a quarta revolução industrial também se encontram em estágio inicial ([PISCHING, 2018](#)). Hoje, o mais consolidado modelo de arquitetura para a Indústria 4.0 é o RAMI4.0 (Modelo de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0). Esse modelo de arquitetura foi apresentado na feira industrial de Hanôver na Alemanha em abril de 2015.

O RAMI4.0 apresenta uma representação tridimensional, conforme a [Figura 2](#). Nos três eixos do RAMI4.0 são descritos os níveis hierárquicos de uma fábrica ligada em rede através da Internet (Eixo Níveis Hierárquicos), a representação de arquitetura dos componentes I4.0 (Eixo Camadas) e o ciclo de vida de instalações e de produtos (Eixo Ciclo de Vida e Cadeia de Valor).

O RAMI4.0, como um modelo de referência, é um elemento para padronização do projeto e implantação de aplicações em I4.0. O RAMI4.0 é uma padronização de linguagem e deve ser aceito e usados por todos os participantes para protótipo, desenvolvimento e validação.

Figura 2 – Representação do RAMI4.0.



Fonte: [Adolphs et al. \(2015\)](#) (adaptado).

1.1 Integração da MDP ao RAMI4.0

Ambos os conceitos de I4.0 e MDP são recentes, surgidos em 2011 ([KAGERMANN; LUKAS; WAHLSTER, 2011](#)) e 2007 ([WAHLSTER, 2007](#)), respectivamente. A área multidisciplinar de estudo envolvendo MDP e I4.0 surgiu em 2013 com o projeto SemProM ([WAHLSTER, 2013b](#)), porém ainda quando I4.0 era um conceito abrangente e sem diretrizes concretas para sua implementação, que ocorreria em 2013 por meio do documento de recomendações para implementação da iniciativa estratégia Industrie 4.0 ([KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013](#)); e sem a criação do modelo de arquitetura de referência para Indústria 4.0 (RAMI4.0), que seria divulgado em 2015 por meio do documento intitulado “RAMI4.0”, divulgado por um periódico alemão ([HANKEL; REXROTH, 2015](#)).

Alguns outros estudos como [Lasi et al. \(2014\)](#) citam MDP como oportunidade de estudo e aplicação dentro da I4.0, outros como [Weyer et al. \(2015\)](#) e [Paelke \(2014\)](#) implementam sistemas práticos envolvendo ambos os conceitos, porém sem considerações sobre cadeia de valor.

Há estudos na área multidisciplinar de I4.0 e MDP, principalmente no meio acadêmico, empresarial e governamental alemão pelo fato de esses conceitos terem surgido na Alemanha. Porém nenhum trabalho até o presente momento relaciona o modelo de arquitetura de referência para a I4.0 (RAMI4.0) com a MDP. I4.0 e a MDP são conceitos altamente correlacionados, porém ainda não amplamente abordados em conjunto na

literatura, o que aponta uma lacuna de conhecimento dentro de I4.0 a ser explorada.

Estudos sobre o RAMI4.0 são importantes no sentido de padronizar a implementação da I4.0 em empresas de diferentes negócios, garantindo assim a interoperabilidade dos serviços. O eixo “Ciclo de Vida e Cadeia de Valor” apresenta diretrizes para o correto planejamento da vida de um produto e sugere cenários para criação de valor perceptível ao produto/serviço. Integrar o conceito de MDP ao RAMI4.0 enriquece o nível de discussão sobre essa arquitetura de referência e dá mais robustez ao modelo para uma futura adoção generalizada por parte de empresas por todo o mundo.

A “Plattform Industrie 4.0” é uma das principais redes mundiais de discussão sobre I4.0 ([KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013](#); [ACATECH, 2014](#); [GERMANY, 2019](#)). O Conselho de Pesquisa da Plattform Industrie 4.0 é o comitê consultivo estratégico da Plattform Industrie 4.0 e identifica necessidades de pesquisa e ações em torno da I4.0. O comitê identificou e definiu quatro temas-chave de abordagens no setor tecnológico, econômico, metodológico e social/legal para se implementar com sucesso a I4.0 ([HIRSCH-KREINSEN et al., 2019](#)), conforme mostrado na [Figura 3](#). Isso significa que os tópicos elencados são temas com alto potencial de otimização de rotinas e processos de produção existentes no cenário de I4.0.

Dentre os temas elencados na [Figura 3](#), destacam-se os subitens relacionados ao tópico “Cenários de criação de valor em Indústria 4.0” por estarem altamente relacionados ao RAMI4.0 e ao conceito de geração de valor por meio da MDP. O desenvolvimento de arquiteturas para geração de valor e a criação de negócios orientados a dados são temas de grande oportunidade dentro do cenário de I4.0, especialmente se considerando os métodos quantitativos de *Business Intelligence* e de análise de dados já estabelecidos.

1.2 Objetivos

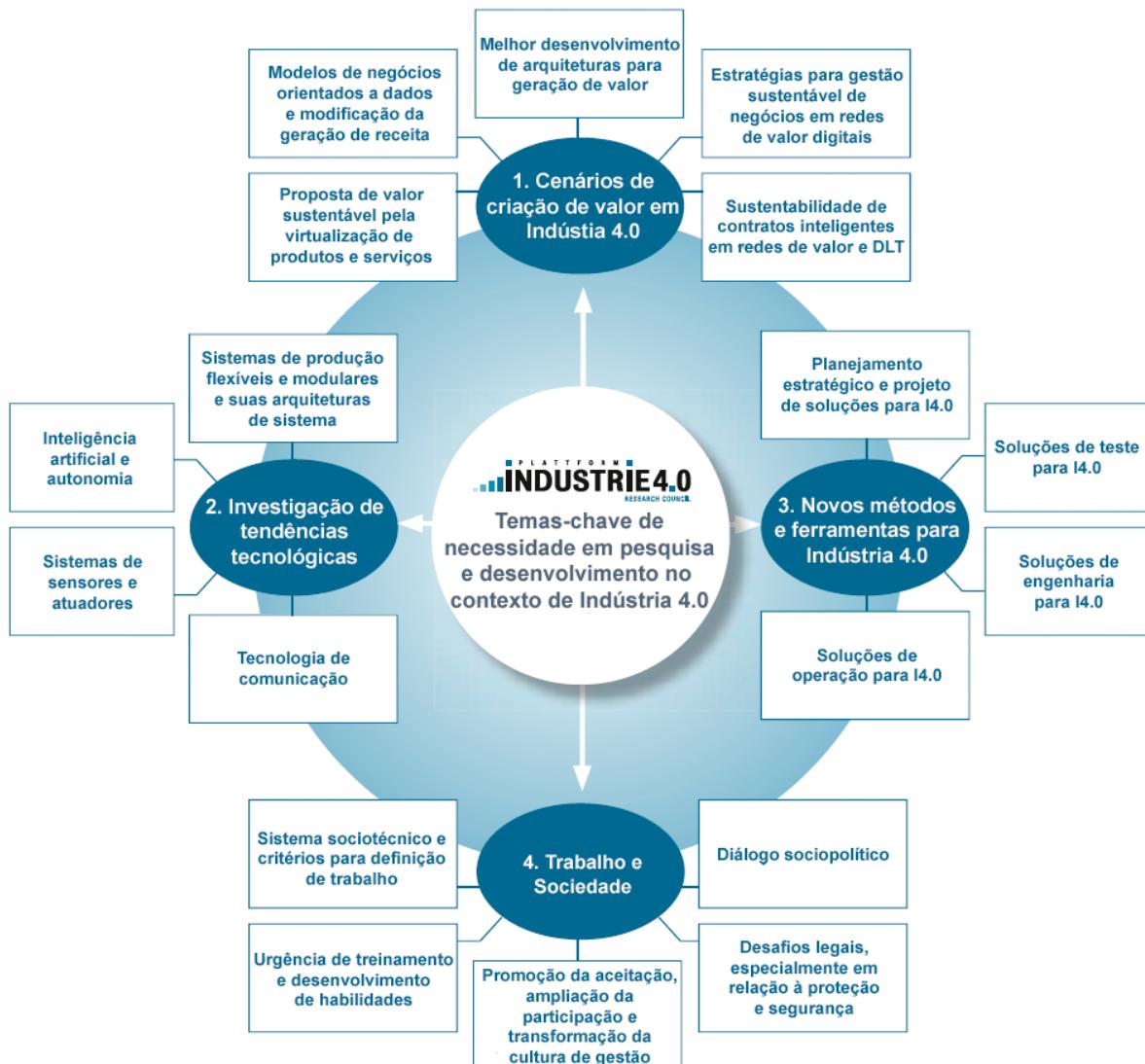
O objetivo do trabalho é a proposta de um arquitetura orientada a serviços baseada no RAMI4.0 para o compartilhamento da memória digital do produto ao longo da cadeia suprimentos.

Para isso, é feita uma integração do conceito de MDP ao RAMI4.0, mapeando suas funções ao eixo Camadas do RAMI4.0.

São feitas também considerações sobre o impacto do amplo compartilhamento da memória digital do produto ao longo da cadeia de suprimentos no ciclo de vida do produto e como isto pode gerar novos modelos de negócio.

Portanto, os eixos “Camadas” e “Ciclo de Vida e Cadeia de Valor” são detalhados de forma a se aperfeiçoar a elaboração dessa arquitetura a fim de proporcionar mais robustez ao modelo para uma futura adoção generalizada por parte de empresas por todo o mundo.

Figura 3 – Temas-chave de pesquisa e desenvolvimento em I4.0.



Fonte: Hirsch-Kreinsen et al. (2019) (adaptado).

Todo o estudo é feito com a proposta de aperfeiçoar o RAMI4.0 no sentido de propiciar o surgimento de novos cenários para a criação de valor no contexto de I4.0 e incentivar a geração de novos modelos de negócio, especialmente aqueles baseados em dados (*data-driven*).

Esta pesquisa envolve o estudo de diversos temas relacionados à Indústria 4.0. Os principais itens necessários para a elaboração da arquitetura de compartilhamento de dados são fundamentados no [Capítulo 3](#).

Tais temas são estudados a fim de se analisar o estado da arte atual em I4.0 e a partir disso propor melhorias e detalhamentos ao RAMI4.0.

1.3 Estrutura do trabalho

O capítulo atual de introdução ([Capítulo 1](#)) apresenta uma abordagem inicial dos conceitos que serão tratados ao longo do trabalho e o objetivo da pesquisa.

O [Capítulo 2](#) detalha a metodologia de pesquisa adotada ao longo de todo o projeto de pesquisa.

O [Capítulo 3](#) apresenta a revisão bibliográfica realizada para a fundamentação dos conceitos necessários para a proposta da arquitetura de compartilhamento de informações do ativo. Cinco conceitos básicos são apresentados nesse capítulo: “Indústria 4.0”, “Logística & Cadeia de Suprimentos”, “Ciclo de vida do produto”, “Memória digital do produto”, “Arquitetura orientada a serviços” e “Modelagem de sistemas”.

O [Capítulo 4](#) apresenta os detalhes da arquitetura proposta baseada em *Web Services* (WS) nos moldes de uma arquitetura orientada a serviços (SOA) compatível com Componentes I4.0 para o compartilhamento de informações do ativo ao longo da cadeia de suprimentos. Neste capítulo também é feito o mapeamento de cada um dos elementos desta arquitetura a cada um dos níveis do eixo Camadas do RAMI4.0.

O [Capítulo 5](#) traz discussões sobre o impacto do amplo compartilhamento da memória digital do produto ao longo da cadeia de suprimentos por meio de *Web Services*, são abordadas possíveis mudanças na curva de ciclo de vida do produto e o surgimento de novos modelos de negócio baseados em dados.

O [Capítulo 6](#) apresenta os trabalhos acadêmicos decorrentes deste projeto de pesquisa que foram publicados e apresentados.

O [Capítulo 7](#) mostra o cronograma com as atividades já realizadas e os próximos passos previstos para a finalização do projeto de pesquisa.

Finalmente, no [Capítulo 8](#) são feitas as considerações sobre a pesquisa e uma conclusão parcial sobre os resultados já alcançados.

2 Metodologia

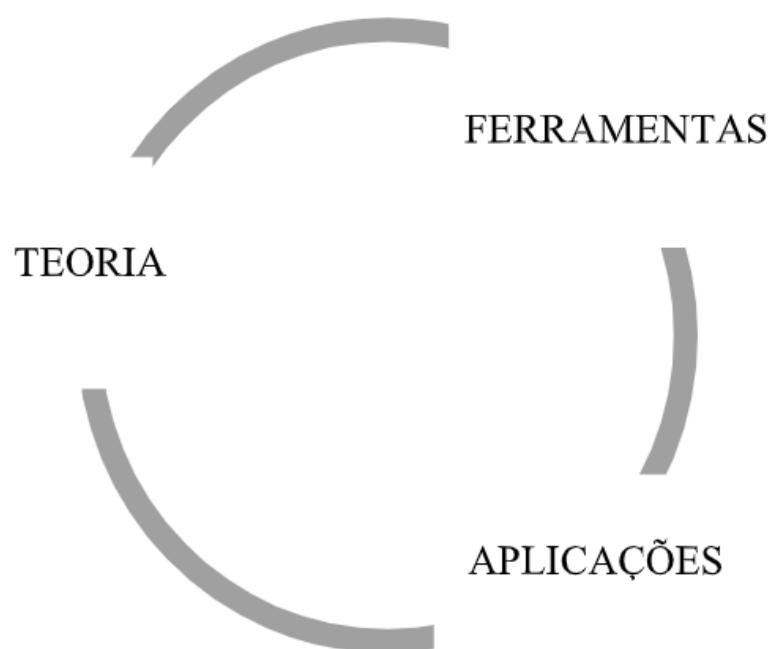
O trabalho é executado a partir de revisão bibliográfica de textos acadêmicos, como dissertações e teses, artigos publicados em revistas acadêmicas, livros teóricos e notas de estudos técnicos. A revisão bibliográfica tem o objetivo de se inteirar do estado da arte das tecnologias envolvidas na Indústria 4.0.

As disciplinas obrigatórias do programa de pós-graduação cursadas durante o período do mestrado foram selecionadas com base na relevância e relacionamento com a natureza da pesquisa em Indústria 4.0 e incluem disciplinas também de outros programas de pós-graduação, como o de Engenharia Elétrica, Engenharia de Transportes e Engenharia de Produção.

A metodologia adotada neste projeto será baseada na proposta por Jensen (1997), onde as etapas de pesquisa são compostas por um ciclo repetitivo de três aspectos, sendo elas: as teorias, as ferramentas e as aplicações; conforme ilustrado na [Figura 4](#).

O próprio conhecimento adquirido nas disciplinas por meio da aprendizagem de novas “ferramentas” pode modificar parte das “aplicações” e com isso realimentar as “teorias” iniciais. Mediante a evolução do projeto ao longo do tempo, novas propostas surgem, e com isso a necessidade do aprendizado de novos conceitos/teorias.

Figura 4 – Metodologia de pesquisa utilizada.



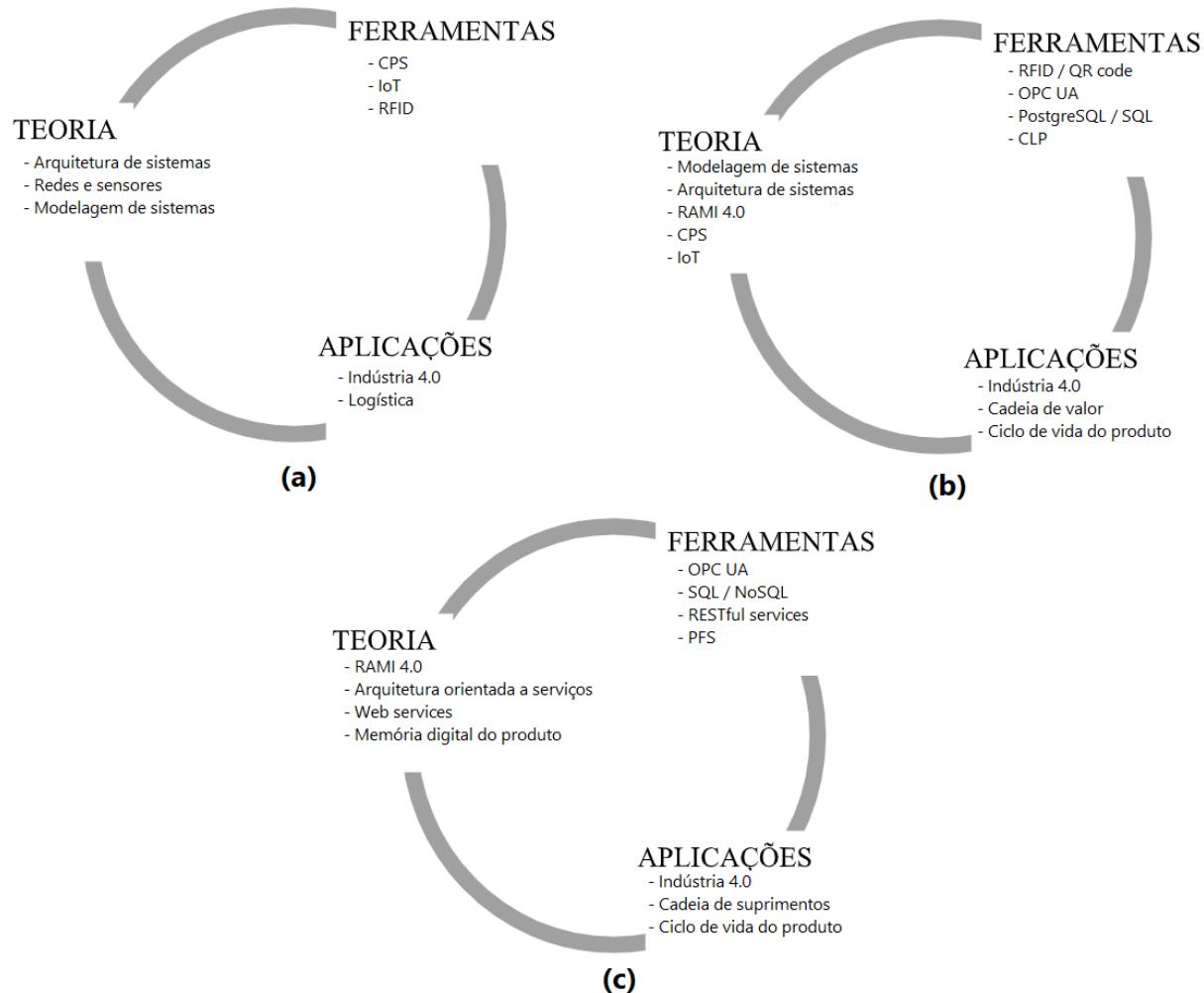
Fonte: [Jensen \(1997\)](#) (adaptado).

Aplicando-se a metodologia proposta por Jensen (1997) para o caso específico da

pesquisa em questão, pode-se listar teorias, ferramentas e aplicações individuais do projeto apresentadas em diferentes fases do projeto de pesquisa.

A [Figura 5](#) mostra os elementos da metodologia de Jensen (1997) reformulados em diferentes fases do projeto: (a) na proposta inicial do projeto de pesquisa, (b) no relatório anual após um ano de pesquisa e (c) no texto para a qualificação do programa de mestrado.

Figura 5 – Teorias, ferramentas e aplicações apontadas em diferentes fases do projeto de pesquisa.



Fonte: O autor.

Os ciclos mostrados na [Figura 5](#) se modificam constantemente a medida que o projeto de pesquisa evolui. Portanto, os três aspectos identificados no ciclo devem evoluir simultaneamente, recondicionando-se mutuamente.

3 Fundamentos

Nesse capítulo é apresentada a revisão bibliográfica necessária para a fundamentação dos capítulos subsequentes.

Seis conceitos básicos são apresentados: “Indústria 4.0”, “Logística & Cadeia de Suprimentos”, “Ciclo de vida do produto”, “Memória digital do produto”, “Arquitetura orientada a serviços” e “Modelagem de sistemas”.

A inter-relação entre esses conceitos é a base para o entendimento e criação da arquitetura para o compartilhamento de informações sobre o ativo ao longo da cadeia de suprimentos e para a elaboração de considerações sobre implicações do massivo compartilhamento de informações no ciclo de vida do produto no contexto da Indústria 4.0.

3.1 Indústria 4.0

Indústria 4.0 (I4.0) é o nome dado às recentes modificações em relação às tecnologias utilizadas em processos industriais e à forma de organização dos sistemas industriais. Tais tecnologias são inseridas com o propósito de se oferecer um alto nível de automação e intercâmbio de informações entre equipamentos e produtos ([LASI et al., 2014](#)).

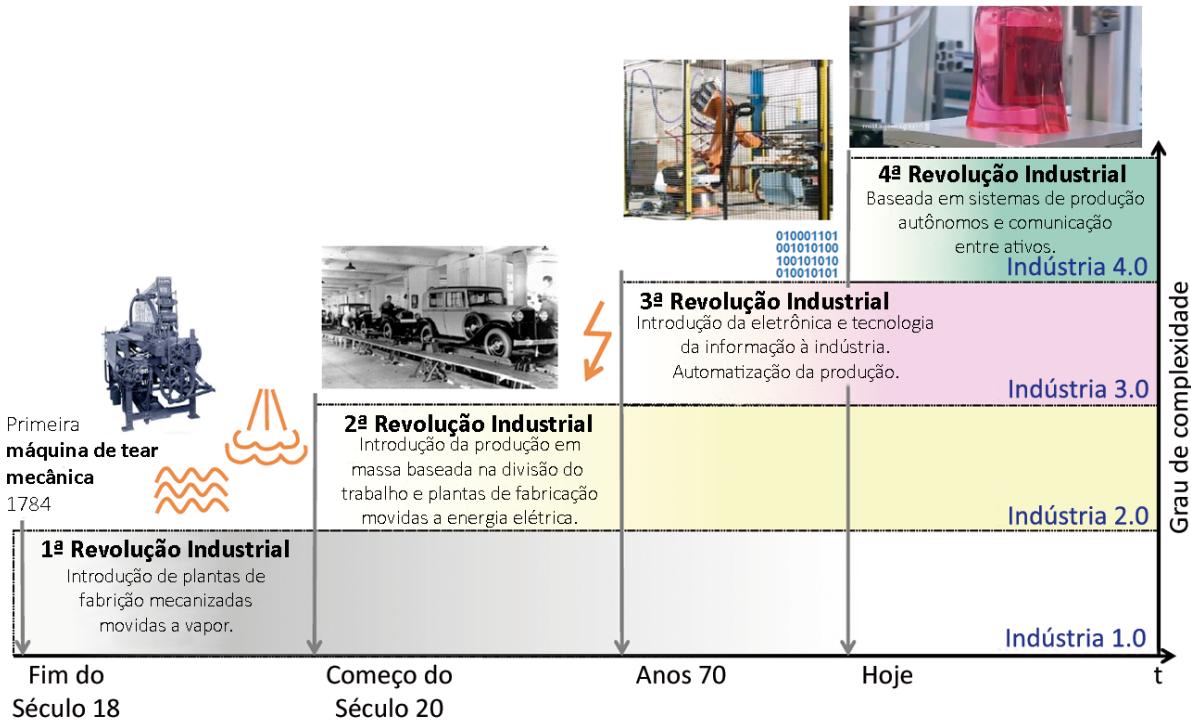
O nome I4.0 se dá pelo fato de ser considerada a quarta grande revolução com relação às tecnologias de produção industrial, sendo as “revoluções industriais” consideradas evoluções tecnológicas que levaram a grandes mudanças no paradigma de produção. As outras transições dentro da indústria ao longo da história aconteceram: no campo da mecanização da produção (1^a revolução industrial), com a produção em massa e intenso uso de energia elétrica (2^a revolução industrial) e com a expansão da automação e eletrônica (3^a revolução industrial) ([LASI et al., 2014](#)). Tal histórico de revoluções no campo da indústria é ilustrado na [Figura 6](#).

O termo I4.0 foi trazido a público pela primeira vez em 2011 na feira industrial de Hanôver (*Hannover-Messe*) ([KAGERMANN; LUKAS; WAHLSTER, 2011](#)), que é uma feira tecnológica de grande relevância internacional e tem o costume de apresentar grandes inovações relacionadas ao setor industrial.

Por vezes, a I4.0 é tratada também como a convergência da produção industrial com as novas Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) ([HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016](#)).

Embora o termo I4.0 seja bastante comum na discussão tecnológica atual, muitas empresas, centros de pesquisa e universidades não mantêm uma definição comum sobre o assunto. Segundo [Hermann, Pentek e Otto \(2016\)](#) e com base em uma revisão de literatura

Figura 6 – Evolução da indústria por meio das revoluções industriais.



Fonte: [Wahlster \(2013a\)](#) (adaptado).

feita pelos mesmos autores, a I4.0 é composta por quatro princípios de projeto para sua implementação, conforme listados na [Tabela 1](#).

Tabela 1 – Princípios para implantação da I4.0 baseados em [Hermann, Pentek e Otto \(2016\)](#).

Princípio	Descrição
Interoperabilidade	Capacidade das coisas (máquinas, dispositivos, sensores, pessoas, etc) de comunicarem entre si dentro de um sistema por meio de padrões definidos.
Transparência de informação	Tornar acessíveis informações úteis para os demais dispositivos conectados à rede. Informações do mundo virtual como documentos eletrônicos, desenhos, modelos de simulação; e informações sobre o mundo real, como posição, dados de sensores de temperatura, vibração, etc.
Descentralização de decisões	Permitir a tomada de decisões baseada nas informações coletadas pelo próprio dispositivo e dar ao dispositivo autonomia para decidir qual será sua próxima função/operação. Desta forma, um planejamento ou controle central de processos produtivos não se faz essencial e o sistema de produção se torna menos hierarquizado.
Assistência técnica	Devido à complexidade da produção, com redes complexas e tomada decisões descentralizadas, os seres humanos precisam ser auxiliados por sistemas de assistência de forma a dar comprehensibilidade ao processo e às tomadas de decisão necessárias. Os sistemas de assistência devem agregar e tornar visualizáveis as informações de maneira comprehensível.

Fonte: O autor.

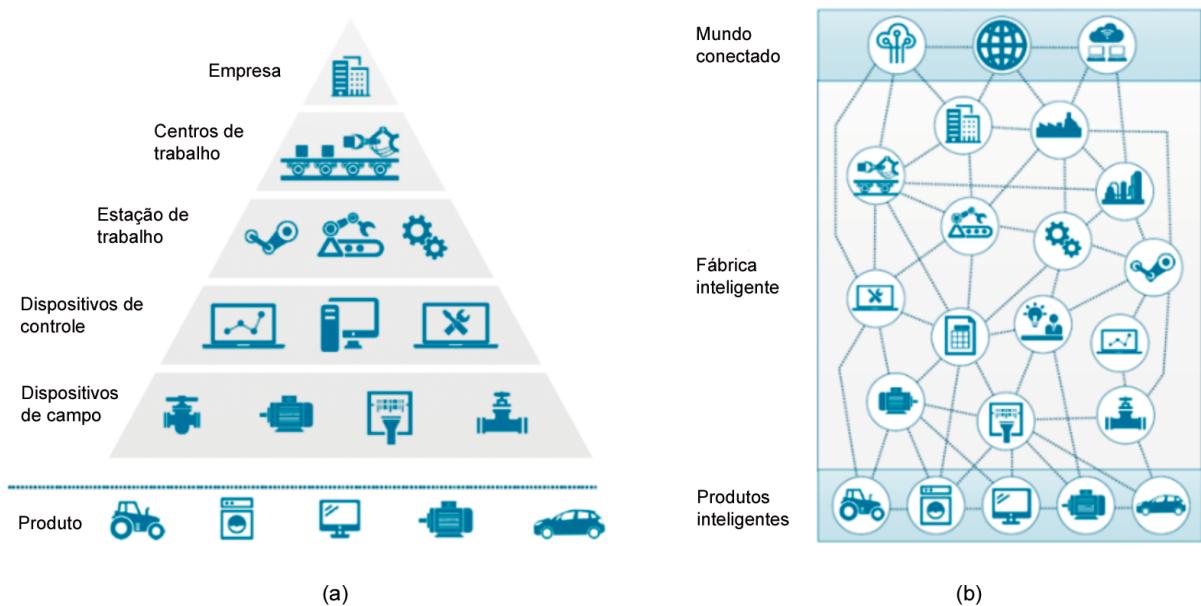
A quarta revolução industrial já está em curso segundo o Fórum Econômico Mundial ([SCHWAB, 2016](#)) em seu encontro anual realizado em Davos no ano de 2016 e as razões

para o surgimento desse novo paradigma de produção incluem: a competição acirrada entre empresas, a alta complexidade de manufatura dos produtos e os seus altos níveis de personalização por parte dos clientes (BORDELEAU; MOSCONI; SANTA-EULALIA, 2018; VAIDYA; AMBAD; BHOSLE, 2018).

Uma das bases para esse novo paradigma de produção é a interligação de objetos no ambiente de produção por meio de identificadores individuais usando conceitos de Internet das Coisas (*Internet of Things - IoT*) e de Internet das Coisas Industrial (*Industrial Internet of Things - IIoT*). Tais “coisas” se referem a equipamentos, produtos, máquinas, peças, pessoas e quaisquer outros elementos envolvidos no ambiente industrial, que por vezes também são denominados “ativos”.

Esses ativos são inseridos no meio digital, onde podem trocar informações entre si e executarem funções sobre seus respectivos correspondentes reais de forma mais autônoma e com menor intervenção humana por meio do uso extensivo de recursos avançados de tecnologias da informação e comunicação (ADOLPH et al., 2018). Devido a essa maior relação entre elementos do sistema de fabricação, extingui-se a relação essencialmente hierarquizada da indústria tradicional e os ativos passam a deter a capacidade de se comunicar diretamente com outros elementos de diferentes níveis, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Transição do (a) modelo hierárquico tradicional para o (b) modelo flexível de comunicação entre dispositivos na Indústria 4.0.



Fonte: Schmittner et al. (2017) (adaptado).

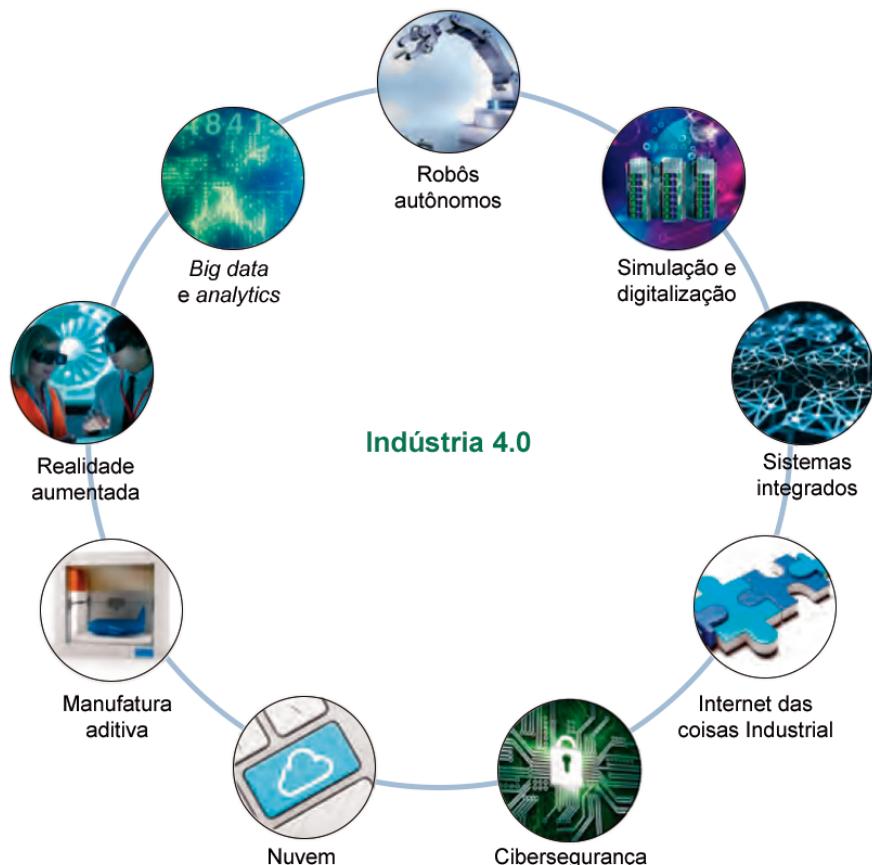
Essa automatização e a troca de informações entre os ativos tem grande potencial de dar mais eficiência aos processos industriais, pois desta forma o sistema pode tomar decisões ótimas com base nas informações que lhe foram fornecidas por meio de sensores

e identificadores. A visão para o futuro da produção baseado na I4.0 envolve sistemas de manufatura modulares e eficientes em cenários nos quais os produtos controlam seus próprios processos de fabricação (LASI et al., 2014).

Há uma tendência global de redução do ciclo de vida do produto devido à rápida introdução de novas tecnologias para satisfazer a demanda dos clientes, especialmente em produtos eletrônicos (TRAPPEY; WU, 2008). A I4.0 se beneficia da chegada de produtos com curto ciclo de vida uma vez que o produto controla seu próprio processo de fabricação, facilitando, assim, ajustes e personalizações por parte do cliente, enquanto preserva os custos, a qualidade e o tempo de aprovisionamento (*lead time*) da produção em massa.

Indústria 4.0 é um conceito. Isto significa que são princípios a serem seguidos e implementados, porém o caminho para a implementação, assim como as tecnologias a serem adotadas podem ser diversos. As peculiaridades de cada indústria e de cada mercado estabelecem diferentes regras de negócios e, portanto, cada setor da indústria pode necessitar de diferentes formas e tecnologias para se implementar a I4.0 e se tornar uma fábrica inteligente. Alguns avanços tecnológicos, entretanto, são muito importantes ou essenciais para a implementação da I4.0 em qualquer sistema de manufatura, alguns deles são mostrados na [Figura 8](#).

Figura 8 – Avanços tecnológicos que moldam a I4.0.



Fonte: Rüßmann et al. (2015) (adaptado).

Após a primeira aparição do termo I4.0 na feira industrial de Hanôver em 2011, o termo ganhou significativa popularidade, principalmente no meio acadêmico e empresarial alemão. O termo foi então incentivado pelo governo alemão (LASI et al., 2014; KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013), que apoiou a ideia e anunciou a Indústria 4.0 como parte integral de sua iniciativa estratégica para a indústria alemã, visando liderança em inovação tecnológica (DRATH; ALEXANDER, 2014) como uma abordagem para fortalecer a competitividade da indústria manufatureira alemã.

Por meio da iniciativa *Plattform Industrie 4.0*, criada em 2013 pelo Ministério Federal da Educação e Pesquisa (*Bundesministerium für Bildung und Forschung*) (GERMANY, 2019) e com o grupo de trabalho “Industrie 4.0 Working Group” em comunicação com diversas associações de engenharia e indústrias alemãs, foram criados documentos oficiais como os de Kagermann, Wahlster e Helbig (2013), Adolph et al. (2018) e Dorst et al. (2016), publicados em inglês, contendo normas e diretrizes para a implementação da I4.0. Esta iniciativa, atrelada ao entusiasmo acadêmico em torno do projeto I4.0, disseminou o conceito fora da área de língua alemã e popularizou o termo I4.0 no mundo todo como epônimo de um futuro projeto no contexto de indústrias de alta tecnologia.

O impacto econômico dessa revolução industrial será enorme, pois a I4.0 promete uma eficiência operacional substancialmente maior, bem como o surgimento de modelos de negócios, serviços e produtos de totalmente novos (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016).

Em revoluções industriais passadas, os países pioneiros a se adaptarem às drásticas mudanças de produção foram os que mais se beneficiaram e se consolidaram como potências econômicas. Na quarta revolução industrial não será diferente. Embora a mudança completa para a I4.0 possa levar 20 anos para ser concretizada (RÜßMANN et al., 2015), nos próximos anos serão estabelecidos avanços importantes que definirão os pioneiros e detentores de tecnologias dessa nova revolução. Portanto, é de interesse de cada país liderar a concorrência global a fim de se consolidar como mercado líder e fornecedor de soluções para a Indústria 4.0.

3.1.1 Modelo de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0

O Modelo de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0, abreviado RAMI4.0, consiste em um sistema de coordenadas tridimensional que descreve todos os aspectos cruciais da Indústria 4.0. Dessa maneira, inter-relações complexas podem ser divididas em grupos menores e mais simples.

A Figura 2 mostrou a representação do RAMI4.0, especificando os itens contidos em cada eixo. A Tabela 2 fornece uma breve descrição de cada eixo do RAMI4.0.

A Figura 9 mostra o detalhamento de cada elemento do eixo Camadas do RAMI4.0 e sua associação ao modelo completo.

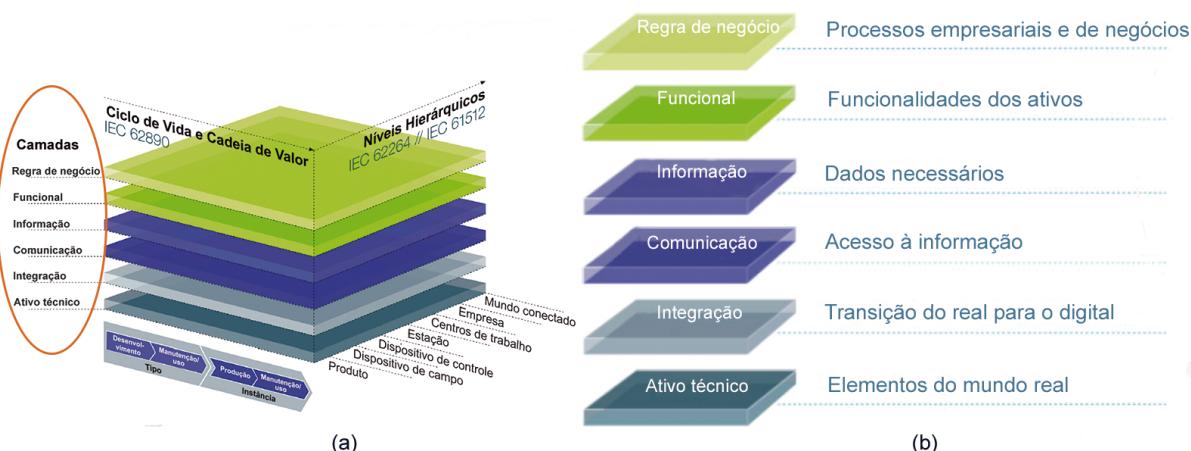
São 6 as camadas do RAMI4.0. O propósito de cada camada, começando da mais inferior (Ativo) para a mais elevada (Regra de Negócio), é descrito a seguir (DORST et

Tabela 2 – Eixos do RAMI4.0.

Eixo	Descrição
Camadas	As seis camadas no eixo vertical descrevem a decomposição de um ativo em suas funcionalidades, isto é, o mapeamento virtual de um ativo. A representação em camadas se origina da tecnologia da informação e comunicação (TIC), onde as funcionalidades de sistemas complexos são comumente divididas em camadas.
Ciclo de vida e Cadeia de valor	O eixo horizontal esquerdo representa o ciclo de vida das instalações e produtos, com base na IEC 62890 para gerenciamento do ciclo de vida. Além disso, é feita uma distinção entre “tipos” e “instâncias”. Um “tipo” é criado na fase de desenvolvimento e, uma vez concluída esta fase, esse tipo é liberado para a produção, servindo como modelo para uma “instância”, que é quando produto real está sendo fabricado e possui um número de série.
Níveis hierárquicos	No eixo horizontal direito estão indicados os níveis hierárquicos da IEC 62264, a série de padrões internacionais para sistemas de TI e controle corporativos. Os níveis hierárquicos representam as diferentes funcionalidades das fábricas. Para representar o ambiente I4.0, as funcionalidades foram expandidas, incluindo adicionalmente o “Produto”, o “Dispositivo de campo” e o “Mundo conectado”.

Fonte: O autor.

Figura 9 – (a) Representação completa do RAMI4.0 e (b) detalhamento de cada elemento do eixo “Camadas”.



Fonte: [Gayko \(2018\)](#) (adaptado).

al., 2016):

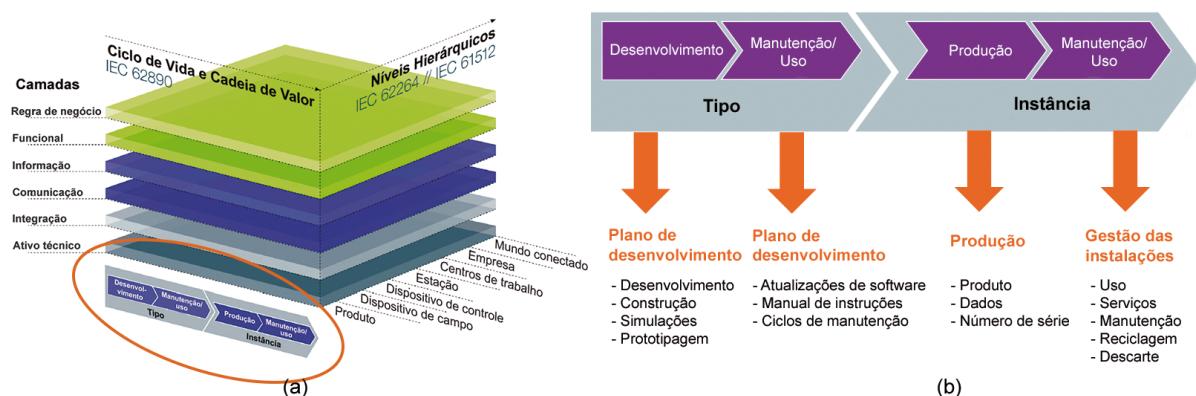
1. **Ativo:** Representa um elemento da realidade não necessariamente físico, como, por exemplo, uma máquina, um *software*, uma documentação, uma ideia, etc. O trabalhador e seu conhecimento sendo aplicado representa também um ativo. Nesta camada física estão os fornecedores de dados, ou seja, os elementos que servirão como fonte de dados. Normalmente estes dados gerados pelo ativo são extraídos e monitorados para fins de controle da planta de produção. Os ativos são integrados ao meio digital através da camada de Integração.
2. **Integração:** Camada responsável pela extração e fornecimento de informações sobre os ativos para as camadas superiores. Representa a digitalização dos ativos. Cada

evento no mundo real é refletido também em um evento no mundo virtual. Se a realidade mudar, esse evento então é relatado à camada de integração e os dados são atualizados no mundo virtual.

3. **Comunicação:** Padronização da comunicação por meio da adoção de um formato de troca de dados uniforme entre os dispositivos. Esta camada é a responsável pela interoperabilidade entre os ativos na I4.0. Aqui ocorre a integração vertical, ou seja, a comunicação entre ativos dentro da mesma empresa. A camada de Comunicação fornece dados sobre o ativo à camada de informação.
4. **Informação:** Controle dos dados do ativo. Esta camada agrupa todos os dados sobre um determinado ativo e é responsável pelo gerenciamento desses dados. Na camada de informação são garantidos que os dados sejam tratados, pré-processados, armazenados e disponibilizados para os demais ativos na rede.
5. **Funcional:** Contém a descrição formal de todas as funcionalidades do sistema. É também a camada responsável pela integração horizontal de ativos, ou seja, é a porta de interação entre Componentes I4.0 de diferentes empresas. Esta camada é a interface para o fornecimento de informações por meio de microsserviços para ativos fora da empresa.
6. **Regra de negócio:** Contém as regras de negócio que o sistema deve seguir como, por exemplo, as condições legais e regulatórias. Esta camada também é responsável por mapear os modelos de negócios e fornecer restrições operacionais da planta de produção.

Já os elementos do eixo “Ciclo de Vida e Cadeia de Valor” do RAMI4.0 são detalhados na [Figura 10](#), juntamente com seu destaque dentro do modelo completo.

Figura 10 – (a) Representação completa do RAMI4.0 e (b) detalhamento do eixo “Ciclo de Vida e Cadeia de Valor”.



Fonte: [Gayko \(2018\)](#) (adaptado).

A I4.0 oferece um grande potencial de aprimoramento dos processos ao longo do ciclo de vida do produto. Este eixo fornece uma representação do estado do ativo ao longo de toda sua cadeia de suprimentos e sua cadeia de valor.

É feita a distinção fundamental entre “tipo” e “instância”, cada um correspondendo a uma fase em que o produto se encontra (ADOLPHS et al., 2015).

Um tipo é sempre criado com uma ideia inicial, ou seja, quando um produto surge na fase de desenvolvimento. Isso abrange o comissionamento, desenvolvimento e testes até a produção inicial de amostras e protótipos (ADOLPH et al., 2018).

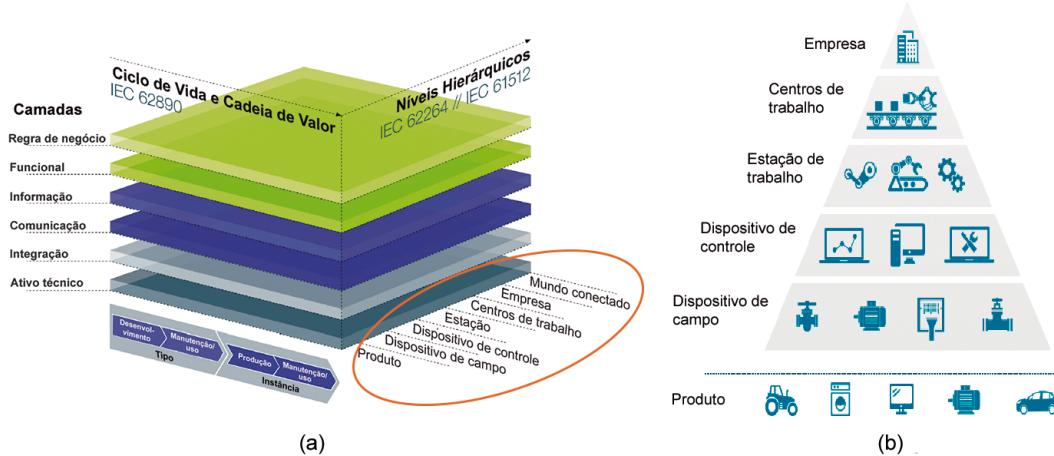
Com a conclusão de todas as etapas de testes e validação, o tipo é liberado para produção em série. A partir de então, novos produtos podem ser instanciados com base neste tipo validado.

Com a fabricação do produto, instâncias são geradas. Cada produto fabricado representa uma instância de um determinado tipo e recebe um número de série exclusivo.

As melhorias sobre um produto feitas pelo fabricante refletem em um novo tipo, que por sua vez pode ser usado para fabricar novas instâncias, acompanhando, assim, o ciclo de vida do produto.

O último eixo descrito, “Níveis Hierárquicos”, do RAMI4.0 é apresentado na Figura 11. Nesta representação, o último nível – “Mundo conectado” (não representado no detalhamento à direita) – é a interconexão e interoperabilidade entre as mais de diversas empresas, que por sua vez possuem todas as demais camadas inferiores listadas.

Figura 11 – (a) Representação completa do RAMI4.0 e (b) detalhamento do eixo “Níveis Hierárquicos do RAMI4.0”.



Fonte: [Gayko \(2018\)](#) (adaptado).

Este eixo representa as diferentes funcionalidades das fábricas e descreve a integração dos sistemas empresariais de controle (PISCHING, 2018).

Este eixo é baseado em uma reformulação da IEC 62264, que é a série de padrões internacionais para sistemas de TI e controle corporativos (HANKEL; REXROTH, 2015),

e faz uma alusão à pirâmide da automação industrial da ISA-95.

Os níveis hierárquicos representam as diferentes funcionalidades das fábricas. Para representar o ambiente I4.0, as funcionalidades foram expandidas além da IEC 62264, que já possui os níveis “Dispositivo de controle”, “Estação de trabalho”, “Centros de trabalho” e “Empresa”.

Para a representação do ambiente I4.0, foi adicionado o nível “Produto” na posição mais inferior para descrever funcionalidades relacionadas ao produto da manufatura, o nível “Dispositivo de campo”, com considerações a nível funcional sobre dispositivos de campo inteligentes, e o nível “Mundo conectado” na posição mais superior para descrever o grupo de fábricas e a colaboração entre empresas, fornecedores de componentes, clientes, etc.

Dentro dos três eixos, todos os aspectos cruciais da I4.0 podem ser mapeados, permitindo que os ativos sejam classificados devidamente de acordo com o modelo. Os conceitos altamente flexíveis da I4.0 podem, assim, ser descritos e implementados usando o RAMI4.0. O modelo de arquitetura de referência permite a migração passo a passo do presente estado da indústria para o mundo da Indústria 4.0.

3.1.2 Asset Administration Shell

Um ativo é qualquer coisa que precise ser conectada para agregar valor a um processo industrial (BADER et al., 2019), ou seja, todos os itens que têm valor em um caso de uso específico. Na I4.0, isso pode ser um produto físico, uma peça de equipamento, um *software* ou documentos como plantas, contratos, pedidos, etc.

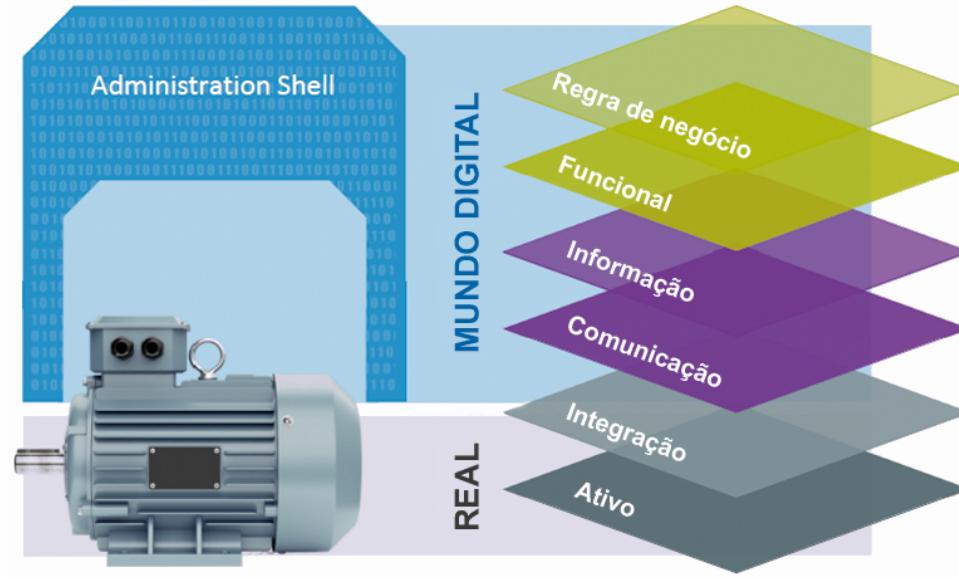
No paradigma da I4.0, cada ativo é encapsulado por uma camada (ou casca) de administração. Esta casca de administração do ativo técnico é denominada “*Asset Administration Shell*” (AAS). O AAS é a representação da parte virtual/digital de um ativo no mundo I4.0 (Ye; Hong, 2019).

Fazendo uma associação ao RAMI4.0, o AAS engloba as camadas digitais, sendo elas: Regra de Negócio, Funcional, Informação e Comunicação; parte da camada Integração também é contemplada pelo AAS, já que essa é a conexão entre o ativo e o meio virtual. Tal associação é representada pela Figura 12.

O AAS consiste em vários submodelos nos quais são descritas todas as informações e funcionalidades de um determinado ativo, incluindo suas características, propriedades, condição, parâmetros, dados de medições e capacidades (BADER et al., 2019). A Figura 13 exemplifica um AAS como sendo uma “casca” que engloba o ativo, esta casca contém informações relevantes do ativo em forma de “submodelos”.

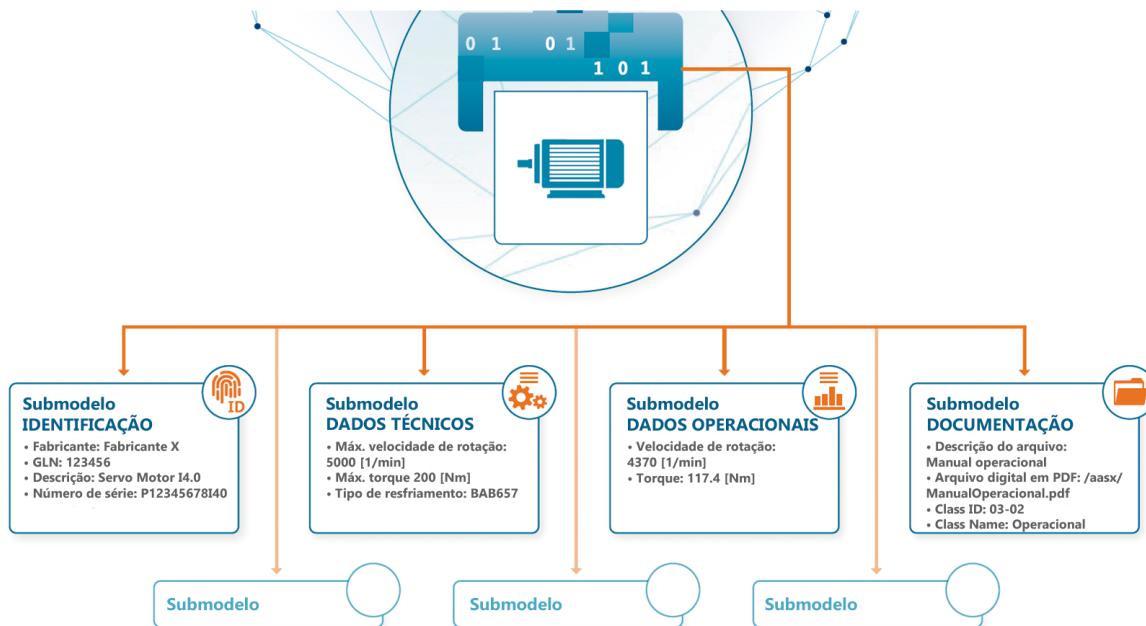
Os submodelos são unidades básicas de organização dentro de um AAS que agregam informações semelhantes. Eles são divididos em dois tipos (Plattform Industrie 4.0, 2019): submodelos básicos e submodelos livres (BADER et al., 2019).

Figura 12 – Representação do AAS como a parte virtual do Componente I4.0.



Fonte: [Gayko \(2018\)](#) (adaptado).

Figura 13 – Exemplificação de um AAS para um servomotor, incluindo os submodelos de identificação, dados técnicos, dados operacionais e documentação.



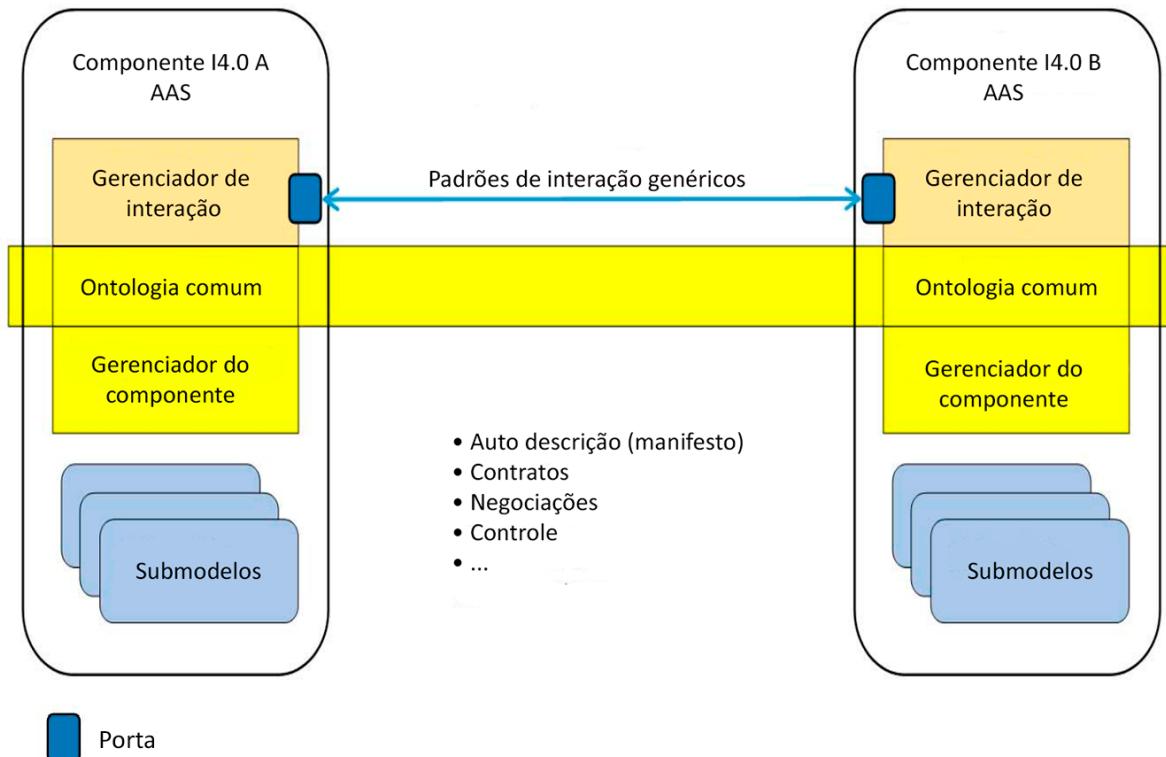
Fonte: [Bader et al. \(2019\)](#) (adaptado).

Os submodelos básicos são unidades de organização que se aplicam a muitos ou todos os ativos dentro do mundo I4.0. Já os submodelos livre são acertados entre os parceiros na cadeia de suprimentos e possuem um uso específico para um determinado produto.

O AAS é um elo entre os ativos reais e seus correspondentes digitais no mundo

conectado. A [Figura 14](#) ilustra a comunicação entre diferentes AASs em um ambiente de manufatura I4.0 sob uma ontologia comum.

Figura 14 – Comunicação entre AASs de componentes I4.0.



Fonte: [Marcon et al. \(2018\)](#) (adaptado).

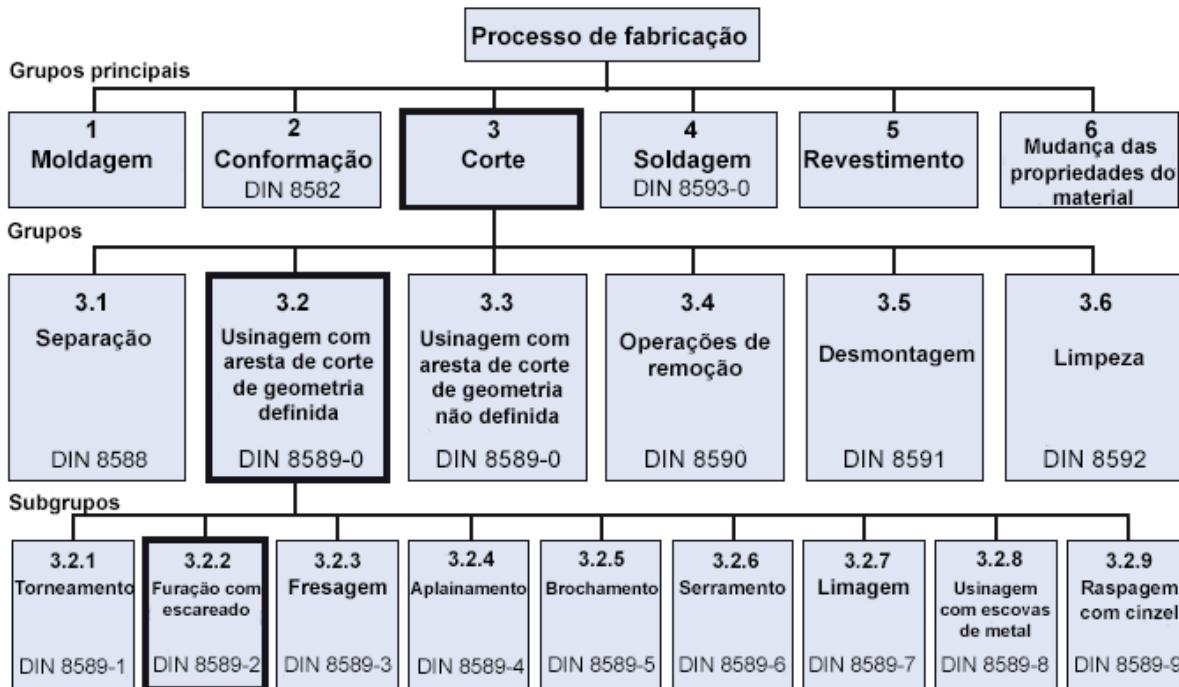
Dentro da I4.0, todos os ativos possuem um AAS com capacidade de comunicação com outros dispositivos. O conjunto Ativo-AAS, que é o objeto real encapsulado pelo *Asset Administration Shell*, é denominado “Componente I4.0”.

A integração dos ativos, representada pelos Componentes I4.0, em um nível funcional requer uma descrição padronizada das funções (ou capacidades) dos ativos em questão. A padronização de submodelos para descrever detalhadamente cada função pode ser usada para definir requisitos para a fabricação de produtos ([BEDENBENDER et al., 2017](#)). A [Figura 15](#) mostra um exemplo de detalhamento de funções de um ativo.

No ambiente de manufatura baseado na I4.0, o produto descreve os requerimentos necessários para sua fabricação e então esses requerimentos são comparados com as descrições das funções das máquinas disponíveis. Portanto, a seleção de um ativo é otimizada, baseando-se nos requerimentos do produto e nas descrições das funções dos ativos.

Desta forma, um Componente I4.0 representa todos os elementos necessários para a efetiva interoperabilidade entre ativos no mundo conectado, inclusive os seus próprios requisitos, suas regras de negócio, limitações técnicas e todas as demais características que se relacionem ao ativo e sua interação com o ambiente.

Figura 15 – Detalhamento de funções no AAS por meio de submodelos.



Fonte: Bedenbender et al. (2017) (adaptado).

3.2 Logística & Cadeia de Suprimentos

A logística é o processo de planejamento, implantação e controle do fluxo de mercadorias, serviços e informações relativas desde o ponto de origem até o ponto de consumo de forma eficiente e eficaz com o propósito de atender as exigências dos clientes (CSCMP, 2013). Essa definição sugere a logística como um processo, o que significa que inclui todas as atividades importantes para a disponibilização de bens e serviços aos consumidores quando e onde estes quiserem adquiri-los (BALLOU, 2006).

A logística é a essência do comércio (BALLOU, 2006), ela contribui para que pessoas não mais sejam obrigadas a viver perto das fontes de produção e possam trocar informações e mercadorias com outras regiões de forma efetiva, contribuindo decisivamente para melhorar o padrão econômico de vida geral.

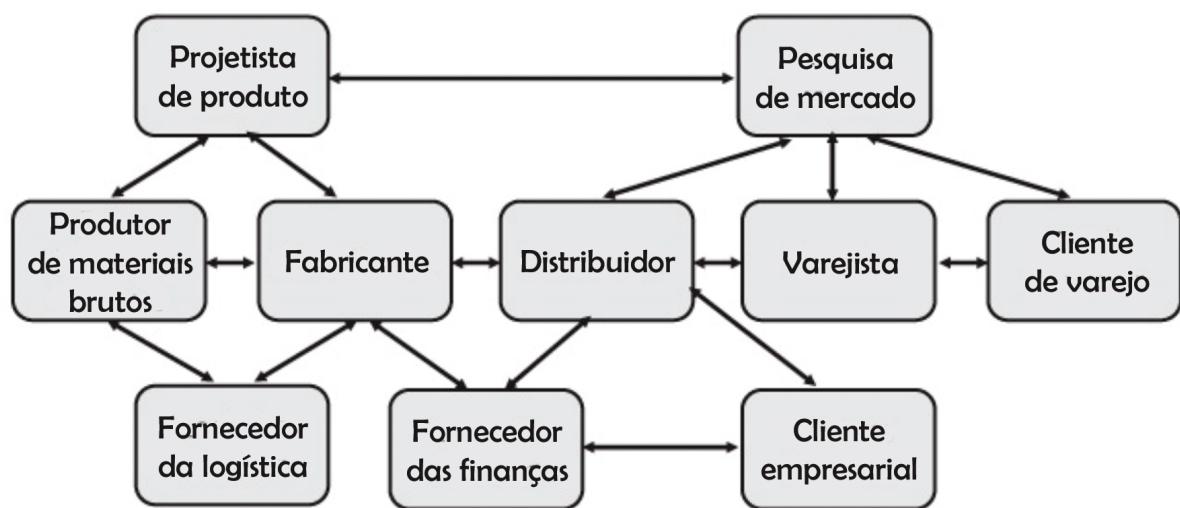
A logística moderna envolve primariamente o compartilhamento de dados. A logística da informação lida com o fluxo de informações entre humanos e/ou máquinas dentro ou entre organizações (HAFTOR; KAJTAZI, 2009), que se agrupam formando uma rede de criação de valor por meio de informações. A Logística da Informação é intrinsecamente relacionada a processos de gestão da informação e tecnologias de informação.

A cadeia de suprimentos (CS), por outro lado, é um conceito mais amplo. A CS é onde a logística é exercida. São as partes necessárias para dar suporte ao pedido de um cliente, desde o produtor até o consumidor final. A gestão da cadeia de suprimentos tem como alvo a orquestração de todas as partes envolvidas por meio de uma logística

integrada de forma a otimizar ao máximo o processo de fornecimento de um produto, serviço ou informação.

A ideia de uma CS simples envolve fornecedor, produtor e cliente (HUGOS, 2018), porém conceitos modernos estendem a noção de uma CS, passando a incluir diversos outros fornecedores de serviços em áreas como logística, finanças, *marketing* e desenvolvimento; que, mediante coordenação e colaboração, criam oportunidades para melhoria dos custos ou serviços ao consumidor. A [Figura 16](#) exemplifica a inter-relação das partes em uma cadeia de suprimentos estendida.

Figura 16 – Exemplo de cadeia de suprimentos estendida.



Fonte: [Hugos \(2018\)](#) (adaptado).

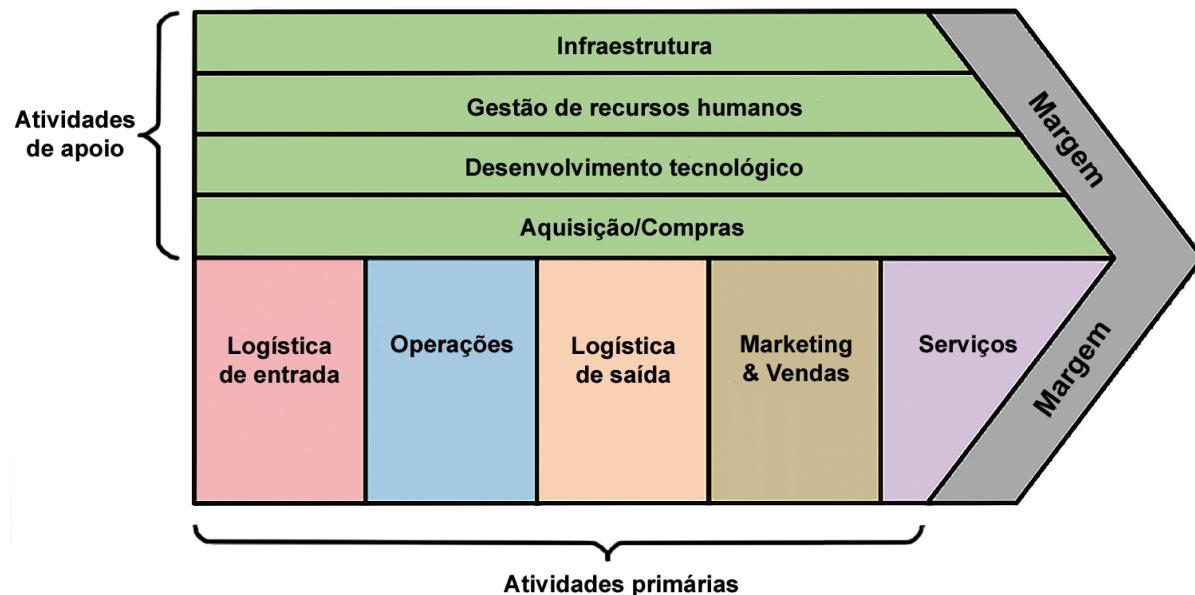
Além do eficiente fluxo de materiais e produtos dentro da CS, é imprescindível a manutenção de um canal para troca de informações entre as partes em uma CS, pois sem uma adequada comunicação, gerentes podem accidentalmente tomar decisões supostamente racionais, porém que afetam negativamente outros líderes da cadeia, como o efeito chicote (LEE; PADMANABHAN; WHANG, 1997), que é a distorção da percepção da procura de um produto que vai se ampliando ao longo da cadeia de suprimentos. Erros de comunicação desse tipo podem acarretar problemas como o aumento do custo de transporte, o elevado tempo de aprovisionamento ao cliente e o desgaste no relacionamento com os fornecedores.

Ao longo da cadeia de suprimentos pode-se observar processos que agregam valor ao produto em desenvolvimento. As etapas de transformação do produto com adição de valor ao longo da CS também podem ser definidas como Cadeia de Valor (CV).

Uma CV é um conjunto de atividades que empresas de um setor específico desempenham a fim de entregar um produto ou serviço que tenha algum valor perceptível para o mercado (PORTER, 1985). A ideia da CV é baseada na agregação de valor ao produto a cada processo de transformação ocorrido, processo esse que envolve a aquisição e consumo de recursos (mão de obra, materiais, equipamentos, instalações, administração, etc). Porter

(1985) classifica a CV em duas categorias de atividades que agregam valor ao produto: as atividades primárias e as atividades de apoio (vide [Figura 17](#)).

Figura 17 – Cadeia de valor de Porter.



Fonte: [Porter \(1985\)](#) (adaptado).

As CVs estão focadas em fornecer o máximo valor ao cliente (valor perceptível) com o menor custo e, portanto, é um indicador para a competitividade da empresa. Com o crescente acirramento da competição entre as empresas, essas devem procurar novas formas de agregar mais valor perceptível aos seus produtos, sendo isto em forma de redução de preço, aumento de qualidade, suporte ou qualquer outra nova funcionalidade.

Outra forma de agregação de valor está no princípio de valor compartilhado, que envolve a geração de valor econômico de forma a criar também valor para a sociedade como um todo ([PORTER; KRAMER, 2011](#)) com o enfrentamento de suas necessidades e desafios. Esta necessidade de valor compartilhado parte da percepção generalizada de que empresas prosperam às custas da depreciação da comunidade que as cercam. Soluções que visem o aumento das condições de trabalho, a maior racionalidade e eficiência no tratamento dos recursos naturais necessários para sua atividade e outras formas de balancear o *trade-off* entre eficiência econômica e progresso social são estratégias para se recuperar a legitimidade e a percepção de valor pela sociedade da atividade empresarial.

3.2.1 Logística 4.0

Com o entusiasmo acadêmico sobre o tema Indústria 4.0 surgido a partir de 2011, diversas novas linhas de pesquisa derivaram do conceito de I4.0. Uma dessas vertentes é relacionada aos novos desafios tecnológicos na logística e por vezes é denominada “Logística

4.0”. Estes novos desafios tecnológicos são relacionados primariamente ao intenso uso das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) e de Internet das Coisas Industrial (IIoT) (BARRETO; AMARAL; PEREIRA, 2017).

A inserção dessas novas tecnologias ao escopo de estudo da logística acarreta em novos desafios como a alta necessidade de transparência dos processos (visibilidade ao longo da cadeia de suprimentos) e o controle de integridade (produtos certos, no tempo, lugar, quantidade, condição e preço certos) (BARRETO; AMARAL; PEREIRA, 2017).

As cadeias de suprimentos atuais podem ser extremamente grandes e complexas (alta interdependência entre as partes) e, portanto, sem uma correta gestão, podem levar à tomada de decisões não ótimas por parte dos gestores humanos. Por esses aspectos, este setor pode ser um dos primeiros a se adaptar a esta nova forma de organização da Indústria 4.0 (ou da Logística 4.0), tornando os processos cada vez mais automatizados a fim de se atender os novos requisitos da sociedade moderna.

Dentro da CS, identificadores individuais podem ser usados a fim de se implementar a conectividade de objetos e informações requeridos no contexto da I4.0.

A tecnologia de RFID (*Radio-Frequency IDentification*) permite criar uma identificação única para um objeto, onde a etiqueta RFID é um pequeno *chip* que pode ser acoplado e incorporado a um produto e assim armazena um código de identificação único, assim como outras informações relevantes, que podem ser transmitidas sem fio via rádiofrequência. O RFID se mostra como uma alternativa ao tradicional código de barras e o *QR code*. A utilização de identificadores individuais é comum para aplicação de conceitos da I4.0 (ALYAHYA; WANG; BENNETT, 2016; VLACHOS, 2014; FAN et al., 2015; BIBI et al., 2017), pois permite a identificação de cada coisa na rede e possibilita a troca de informações autônomas.

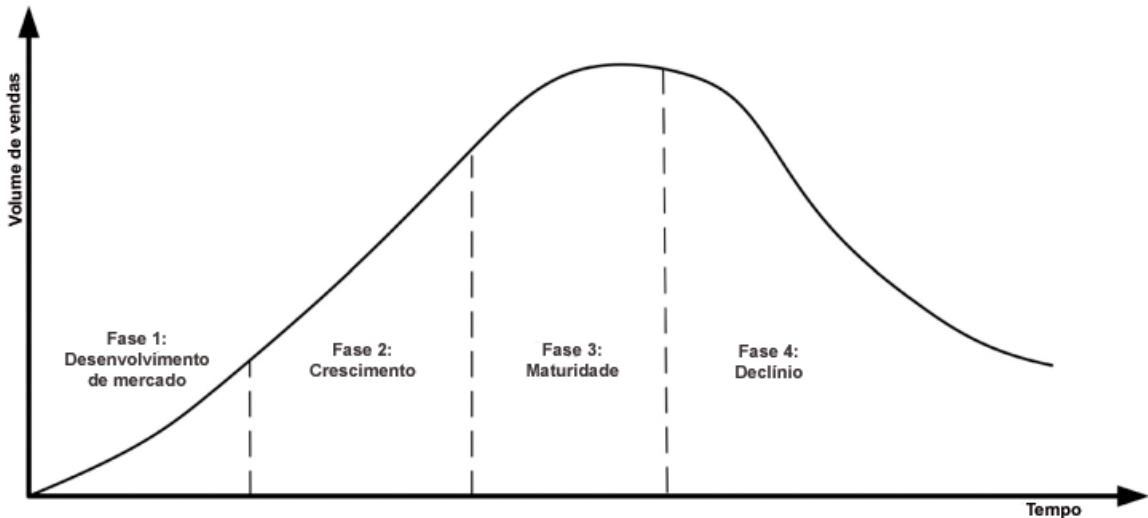
A Logística 4.0, portanto, estabelece uma série de paradigmas que empresas atuando no ramo logístico deverão seguir nos próximos anos para se manterem competitivas. Conceitos de operação como o intercâmbio de informações instantâneas, soluções automatizadas e análise de dados em tempo real abrem caminhos para novos modelos de negócios (STRANDHAGEN et al., 2017), que se tornarão essenciais na eficiência em logística moderna.

3.3 Ciclo de vida do produto

O conceito de ciclo de vida do produto foi elaborado em meados da década de 1960 com o propósito de criar um modelo que fosse capaz de explicar o sucesso ou fracasso de um produto introduzido no mercado, sendo capaz também de identificar momentos certos para modificar estratégias de preço, fabricação e quando o produto deve ser descontinuado (CAO; FOLAN, 2012). O modelo inicialmente desenvolvido por Levitt (1965) mostra o padrão de produtos na história passando por quatro estágios bem definidos: desenvolvimento de

mercado, crescimento, maturidade e declínio, conforme observado na [Figura 18](#).

Figura 18 – Estágios do ciclo de vida do produto.



Fonte: [Levitt \(1965\)](#) (adaptado).

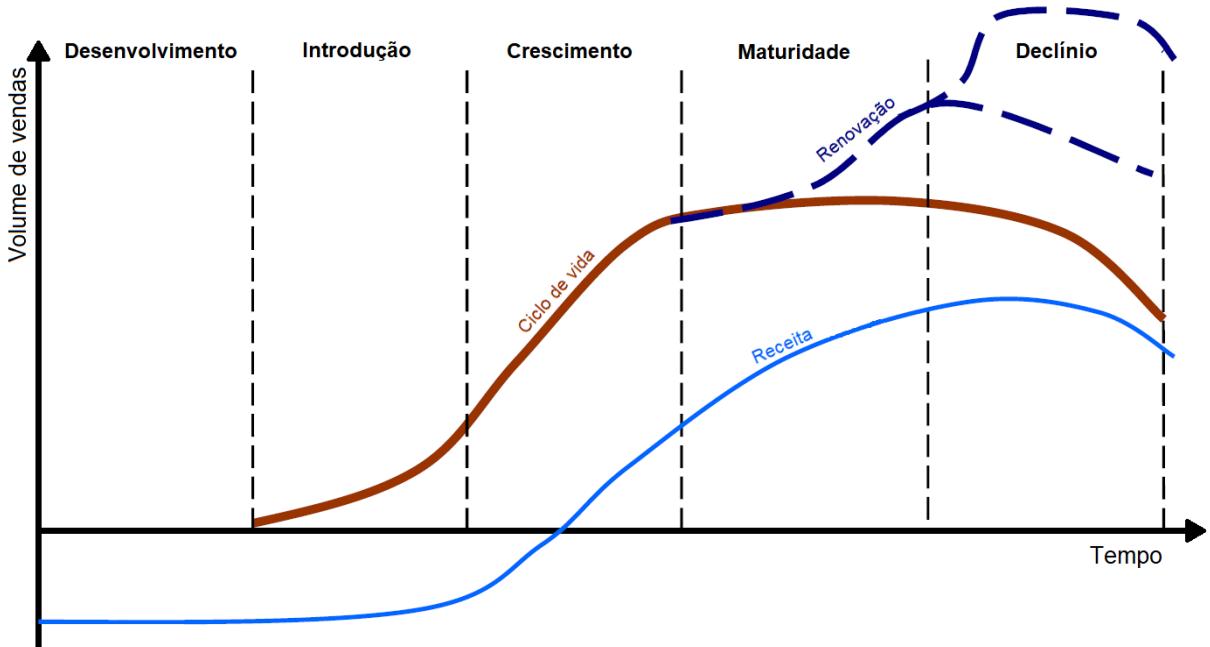
Vista a tendência global de redução do ciclo de vida do produto devida a rápida taxa de introdução de novas tecnologias para satisfazer a demanda dos clientes, especialmente no mercado de produtos eletrônicos ([TRAPPEY; WU, 2008](#)), novas versões de modelos de ciclo de vida do produto vêm sendo elaboradas considerando outros aspectos de mercado e não somente sob a visão da área de *Marketing*. Por vezes, estudos recentes envolvendo ciclo de vida são denominados “engenharia do ciclo de vida do produto” (E-CVP) ([CAO; FOLAN, 2012](#)) e levam em consideração fatores não abordados nos modelos originais como, por exemplo, a fase de pesquisa e desenvolvimento, a retroalimentação de dados, assim como o descarte e reciclagem do produto. Sempre tendo como objetivo auxiliar na tomada de decisões para o sucesso de um produto no mercado.

A [Figura 19](#) mostra um modelo de ciclo de vida do produto com elementos que incluem a fase de desenvolvimento e a renovação do produto. A renovação do produto e a decorrente extensão de sua vida é essencial, pois mantém o produto no mercado na forma de novas versões e, assim, amplia as receitas mediante ações estratégicas para agregação de valor. O modelo do ciclo de vida e os elementos presentes sempre irão variar conforme a natureza do produto e tipo de mercado consumidor onde o mesmo está inserido.

A gestão do ciclo de vida do produto (GCVP) refere-se ao gerenciamento de um ativo ao longo dos estágios típicos de sua vida útil (vide [Figura 18](#)). Esta gestão dentro dos estágios mencionados pode se referir, por exemplo, à fabricação, comercialização, uso ou qualquer outra fase do ciclo de vida em que o produto se encontra.

A GCVP tem como finalidade auxiliar gestores na tomada de decisões de negócios por meio de estratégias como políticas de preços, expansão de mercado, retirada do produto ou inserção de novas versões, etc. A função da GCVP não é gerenciar apenas um produto,

Figura 19 – Modelo de ciclo de vida do produto com renovação do produto.



Fonte: [Liu \(2010\)](#) (adaptado).

mas gerenciar de maneira integrada todas as partes, assim como o portfólio de produtos da empresa ([STARK, 2015](#)).

Em nível mais alto, o objetivo do GCVP é aumentar as receitas do produto, reduzir os seus custos relacionados, maximizar o valor do portfólio e maximizar o valor dos produtos atuais e futuros para clientes e acionistas ([STARK, 2015](#)).

Mais recentemente, novas propostas de modificações de processos industriais por meio da GCVP aparecem como formas de se agregar mais valor ao produto/serviço considerando os ciclos de vida do produto cada vez mais curtos. A Indústria 4.0 e a Logística 4.0 surgem com novas formas de abordagem da gestão do ciclo de vida do produto, considerando as mais novas necessidades do produto e de seus respectivos consumidores.

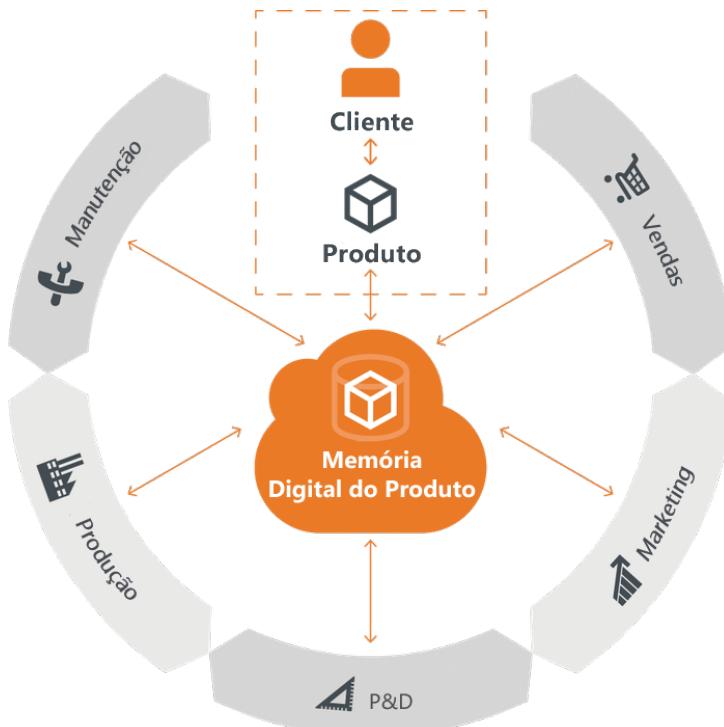
3.4 Memória digital do produto

O termo “Memória Digital do Produto” (MDP) surgiu pela primeira vez em 2007 por meio de um boletim de notícias de tecnologia de uma empresa alemã fabricante de conectores elétricos e eletrônicos ([WAHLSTER, 2007](#)). À época, o termo foi tratado com analogia a um diário, que mantinha todas as informações do produto ao longo de seu ciclo de vida.

Hoje, o conceito na literatura se refere a sistemas que permitem a coleta de dados em todas as fases do ciclo de vida do produto para a distribuição e/ou análise. Os dados

de interesse do produto podem ser relativos a qualquer fase do produto ao longo de sua cadeia de suprimentos, o que abrange dados de produção individual, de montagem, de distribuição, de uso por parte do consumidor, etc. A [Figura 20](#) ilustra o conceito de MDP.

Figura 20 – Coleta de dados do produto ao longo da cadeia de valores.



Fonte: [Zühlke \(2020\)](#) (adaptado).

Sua relevância está no fato da tendência de produtos novos apresentarem ciclos de vida cada vez mais curtos e devido ao fato das cadeias de suprimentos apresentarem redes cada vez mais complexas, com múltiplos fornecedores e clientes. Com isso, a MDP manteria registros digitais do ciclo de vida dos produtos, faria o monitoramento constante do seu estado atual e realizaria o rastreamento de sua posição. Segundo [Wahlster \(2007\)](#), o acesso a essas informações pelas partes interessadas seria de vital importância na competitividade de empresas produtoras e de comércio, além de abrir novas proteções em relação à pirataria.

Os produtos que são produzidos no cenário de Indústria 4.0 podem ser equipados com a MDP e por meio dela extraír e armazenar informações relevantes de eventos ocorridos ao longo do ciclo de vida do produto a fim de fornecer serviços a todo o ambiente com o qual o produto se relaciona ([BRANDHERM; KRONER, 2011](#)). A MDP fornece também uma forma de rastreabilidade, uma vez que pode armazenar informações geoespaciais do ativo ao longo do tempo.

Implementações de uma memória com informações sobre produto ao longo de sua cadeia de suprimentos é importante, pois torna possível acessar e utilizar informações do mundo real providenciada por diferentes fontes para o potencial benefício das partes interessadas naquele produto ([BRANDHERM; KRONER, 2011](#)), como, por exemplo,

fabricantes, transportadores, varejistas e consumidores. E também no pós-venda, onde a MDP continua a ser disponibilizada e ativa, dando a possibilidade ao consumidor de ainda manter contato com cada elo da cadeia de suprimentos e se beneficiar de serviços individuais que se acumulam na memória (BRANDHERM; KRONER, 2011).

3.5 Arquitetura orientada a serviços

Arquitetura Orientada a Serviços (SOA) é um estilo de projeto de *software* em que serviços são disponibilizados a outros sistemas por meio de um protocolo de comunicação comum em uma rede (BELL, 2008). Um serviço é uma unidade de funcionalidade que pode ser fornecida/acessada remotamente. A SOA se destina a ser independente de fornecedores, produtos e tecnologias.

Para quem consome um serviço, a abordagem é como uma caixa preta, o que significa que o consumidor não sabe ou não precisa estar ciente do funcionamento interno deste serviço, sendo apenas o seu resultado relevante. Os serviços representam uma lógica de fornecimento de resultados. É uma abstração de problemas, ou seja, toda a complexidade interna inerente aos serviços pode ser abstraída/desconsiderada pelos consumidores dos serviços.

Dentro do mundo da Indústria 4.0 e de sistemas produtivos, a SOA é uma abordagem que traz novas perspectivas uma vez que se estabelece um conjunto de princípios para uma arquitetura de sistema autônomo e interoperável (CÂNDIDO et al., 2009), que tem por objetivo aumentar a eficiência, agilidade e produtividade de um sistema por meio da adoção generalizada do conceito de serviços (SOUT, 2013).

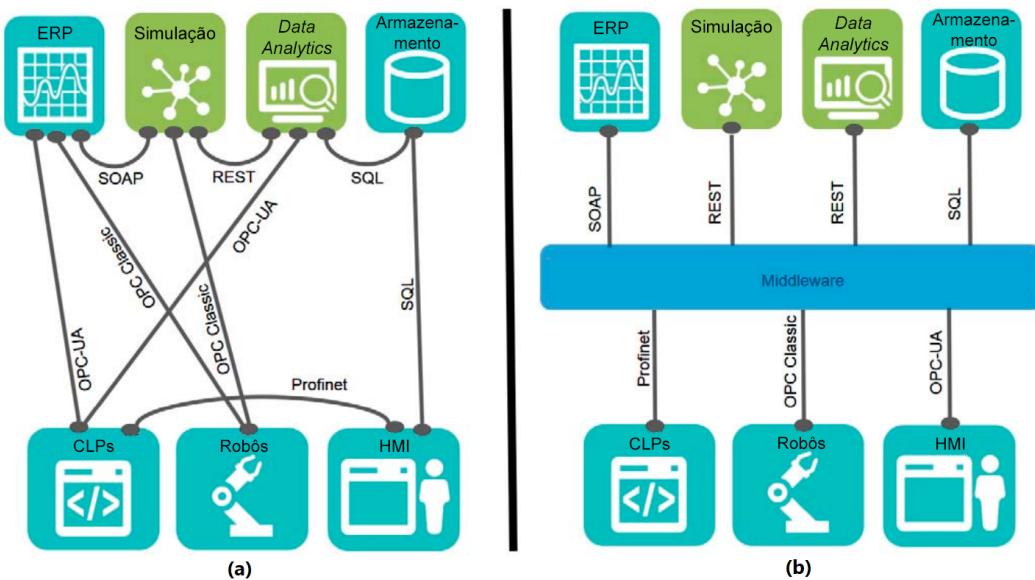
Os serviços dentro do ambiente de manufatura encapsulam as funcionalidades necessárias, ocultando todas as heterogeneidades das partes do sistema, permitindo, desta forma, características de flexibilidade, confiabilidade e fácil implementação de soluções (GROBA et al., 2008).

A SOA dentro do meio industrial permite que um sistema atue como *middleware*, ou seja, uma camada ou componente de *software* que integra os diferentes aplicativos em um sistema. A Figura 21 ilustra como se dá a interconexão entre os elementos do sistema com e sem um *middleware*.

SOA está relacionada à ideia de uma Interface de Programação de Aplicação (*Application Programming Interface - API*), que é o conjunto de rotinas e padrões estabelecidos por um *software* para a utilização das suas funcionalidades por aplicativos externos.

Para se disponibilizar um serviço por meio de uma API, o conceito de *Web Services* (WS) é vastamente utilizado (SOUT, 2013). Os WSs podem ser vistos como um conceito padrão para facilitar a interoperabilidade, integração e reuso dos componentes de aplicações.

Figura 21 – Interconexão entre os elementos do sistema (a) com um *middleware* e (b) sem um *middleware*.



Fonte: Gosewehr et al. (2017) (adaptado).

3.5.1 Web Services

Um *Web Service* (WS) é uma interface que descreve uma série de operações acessíveis por meio de uma linguagem de descrição de serviços padronizada (GOTTSCHALK et al., 2002). Um WS executa uma tarefa específica ou um conjunto de tarefas e retorna ao usuário o resultado da operação. Cada aplicação pode ter a sua própria linguagem, que é traduzida para uma linguagem comum, como um XML, JSON, CSV, etc.

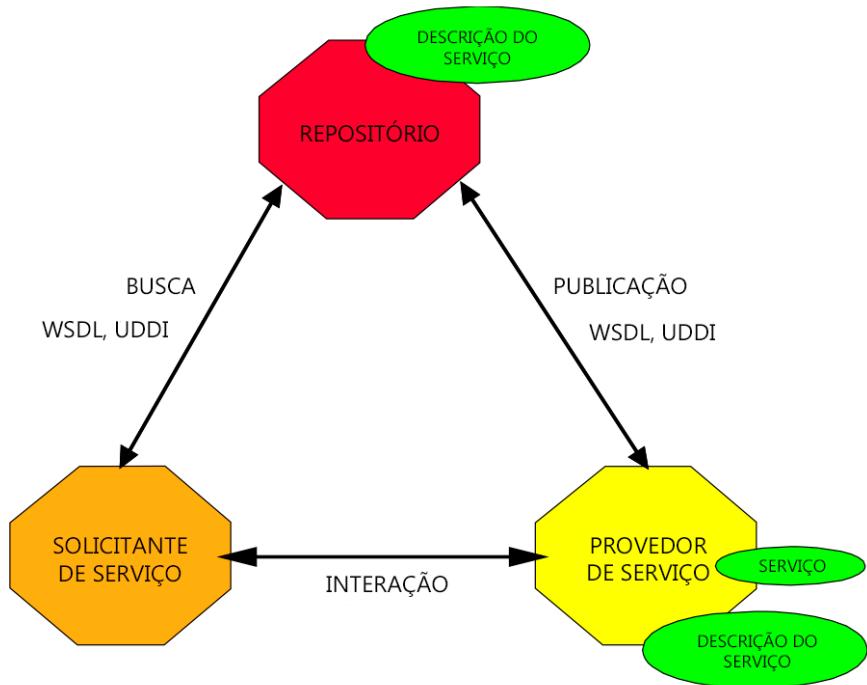
Por meio de WSs, as aplicações podem ser descritas, publicadas, localizadas e invocadas em uma rede de comunicação tipo WWW (*World Wide Web*) (SOUT, 2013).

A arquitetura de um WS é constituída por três atores básicos: o provedor de serviços, o repositório de serviços e o solicitante de serviços; e por três operações básicas: a publicação, a procura e a interação (GOTTSCHALK et al., 2002). A Figura 22 ilustra os atores e a interação entre eles por meio das operações.

webservice-componentes Detalhadamente, os atores em um WS são:

- **Provedor de serviços:** Representa a plataforma que hospeda e fornece um determinado serviço, esta plataforma permite que clientes solicitem serviços e recebam suas respectivas respostas. O provedor de serviços é responsável também por fornecer uma descrição sobre o serviço prestado e publicar esta descrição em um repositório acessível pelo solicitante.
- **Repositório de serviços:** É uma plataforma acessível com a função de armazenar e fornecer a descrição sobre diversos WSs. Os WSs são descobertos pelo solicitante por meio do repositório para que assim possa decidir o serviço que melhor o atenda.

Figura 22 – Componentes de um WS e operações.



Fonte: Kreger et al. (2001) (adaptado).

- **Solicitante de serviços:** É o ator que necessita de um determinado serviço e requisita a sua execução. O solicitante de serviço pode ser uma pessoa acessando um navegador ou uma aplicação realizando solicitações por meio de APIs.

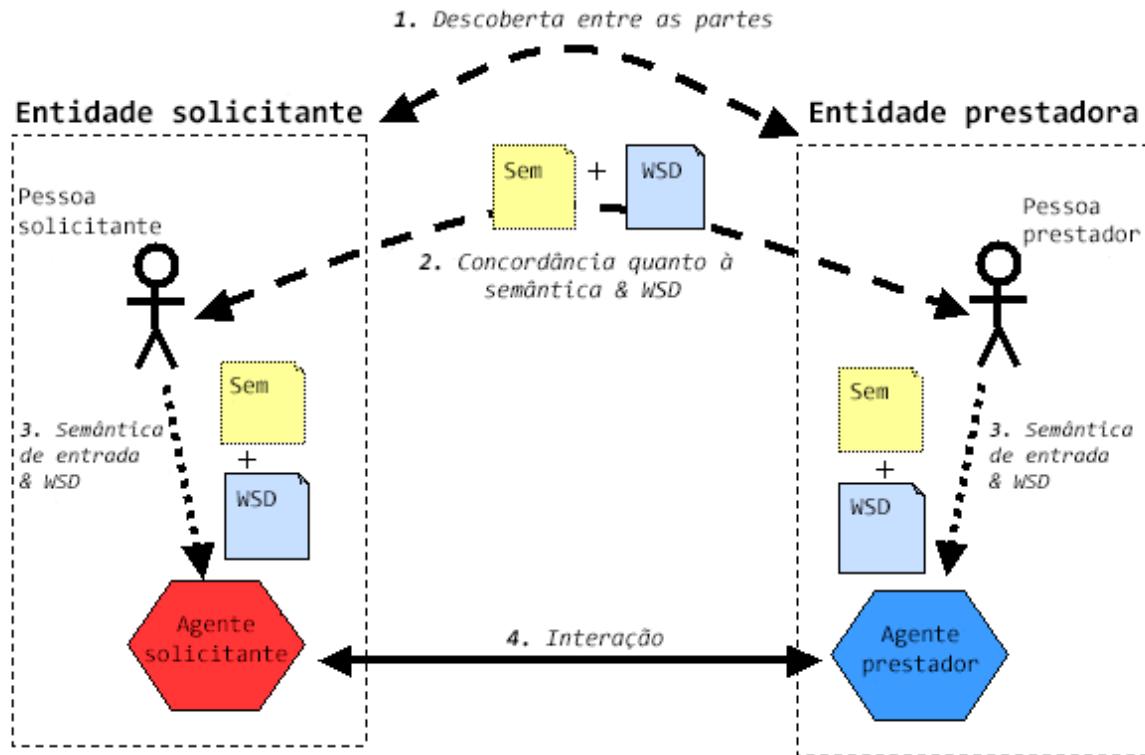
Já as operações básicas em WS em detalhe são:

- **Publicação:** Publicação da descrição do serviço pelo provedor em um repositório para que o serviço se torne acessível ao público e os solicitantes possam localizá-lo.
- **Busca:** Busca e recebimento da descrição de um serviço. O solicitante pode receber a descrição do serviço pelo provedor ou por meio do repositório.
- **Interação:** Comunicação direta entre solicitante e provedor para o fornecimento de serviços. Nesta fase, o solicitante se decide por um determinado serviço dentre os disponíveis no repositório e inicia uma interação com o provedor por meio de uma API.

As etapas de interação entre as entidades são representadas por meio de diagrama UML na [Figura 23](#).

Neste diagrama a Semântica e a Descrição do Web Service (*Web Service Description* – WSD) representam os documentos com os quais ambas as partes devem concordar para que haja o efetivo fornecimento e consumo do serviço.

Figura 23 – Diagrama UML com os atores e interações em um WS.



Fonte: [Booth et al. \(2004\)](#) (adaptado).

O WSD define os formatos de mensagem, tipos de dados, protocolos de transporte e formatos de troca de dados que devem ser usados entre o solicitante e o provedor ([BOOTH et al., 2004](#)). O WSD representa um acordo que rege a mecânica de interação com esse serviço.

Já a Semântica de um WS é o documento que compartilha o comportamento esperado de resposta deste serviço, pode ser explícito ou implícito, oral ou escrito, processável por máquina ou orientado a humanos, e pode ser um acordo legal ou um acordo informal ([BOOTH et al., 2004](#)).

Os WSs se tornaram bastante atrativos, pois esse modelo pode ser aplicado com tecnologias acessíveis ao solicitante, em particular XML e HTTP, que podem ser acessadas pela maioria dos navegadores convencionais. A disponibilização de serviços interativos na *Internet* se tornou muito popular e com isso surgem novos modelos de negócios como o SaaS (*Software as a Service*), PaaS (*Platform as a Service*), IaaS (*Infrastructure as a Service*), etc.

Dentro do mundo da Indústria 4.0 não é diferente. Ativos podem publicar suas funcionalidades em repositórios e executarem determinadas tarefas mediante solicitação por parte do solicitante, podendo assim serem classificados como uma manufatura como um serviço (*Manufacturing as a Service*) ([ANNUNZIATA, 2019](#); [NICHOLS, 2019](#); [SIEPEN, 2019](#)).

3.5.2 Transferência Representacional de Estado

A Transferência Representacional de Estado (*Representational State Transfer - REST*) é uma arquitetura de *software* que define padrões para acesso e disponibilização de *Web Services* (WSs). Os WSs que seguem o padrão REST são denominados *RESTful Services*.

A arquitetura REST possibilita a interoperabilidade entre sistemas na *Internet*, pois permite que os sistemas solicitantes acessem e manipulem representações textuais de recursos usando um conjunto uniforme e predefinido de operações sem estado (FERRIS, 2004).

Quando o HTTP é usado como protocolo de comunicação em um *RESTful Service*, cada método do protocolo recebe um tipo de operação padrão do REST. A Tabela 3 mostra as possíveis operações e seus métodos HTTP correspondentes, quando este protocolo é utilizado.

Tabela 3 – Possíveis operações em um *RESTful Service*.

Operação	Método HTTP	Resposta
Criação	POST	201 (Criado)
Leitura	GET	200 (OK), 404 (Não encontrado)
Atualização	PATCH	200 (OK), 204 (Sem conteúdo), 404 (Não encontrado), 405 (Não permitido)
Exclusão	DELETE	200 (OK), 404 (Não encontrado), 405 (Não permitido)

Fonte: (FIELDING; TAYLOR, 2000) (adaptado).

3.6 Modelagem de sistemas

Sistemas são um conjunto de elementos interdependentes de modo a formar um todo organizado. Também pode ser entendido como um conjunto de órgãos funcionais, componentes, entidades, partes ou elementos e as relações entre eles, com um objetivo geral a ser atingido (MÜLBERT; AYRES, 2005).

No contexto da Logística 4.0, um sistema pode ser definido como o conjunto de diferentes cadeias de suprimentos ligadas por meio de relacionamentos interorganizacionais, que fazem acontecer os fluxos envolvidos (de dinheiro, materiais, bens e informações) (OLIVEIRA; LIMA; MONTEVECHI, 2016).

A modelagem e análise dos sistemas na cadeia de suprimentos é uma ferramenta para melhorar a eficiência da cadeia como um todo. As vantagens de sua utilização podem possibilitar a capacidade de capturar e entender o comportamento da rede, a reprodução

e análise de diferentes cenários e soluções, previsibilidade de possíveis perturbações de mercado e melhoria nos processos de distribuição.

Com a intensificação da globalização, é cada vez mais comum a criação de cadeias de suprimentos complexas, envolvendo várias organizações dispersas geograficamente. Por isso, as ferramentas de suporte à tomada de decisões podem auxiliar no sentido de fornecer uma solução mais adequada à dinâmica de diversas redes. A modelagem é uma das formas de auxílio à tomada de decisões e pode ser uma ferramenta útil para se entender as interações e melhorar a performance da CS (OLIVEIRA; LIMA; MONTEVECHI, 2016).

Um desafio para desenvolvimento de bons modelos nessa área é a adoção de metodologias claras que possam facilitar e agilizar o processo de se realizar a modelagem e a análise de aspectos da cadeia de suprimentos. Uma metodologia apresenta apenas um direcionamento sobre os procedimentos a serem tomados a fim de se atingir um objetivo, porém cada problema a ser analisado requer especificações diferentes, o que demanda adaptações dos procedimentos originais.

Miyagi (1996) define os sistemas feitos pelo homem (*man-made systems*) como sistemas de manufatura, transporte, comunicação, redes de computadores, etc. Estes sistemas seriam caracterizados por uma dinâmica decorrente da ocorrência de eventos e, portanto, são classificados como Sistemas a Eventos Discretos (SED).

Um SED é uma classificação do sistemas de acordo com seu comportamento determinado pela ocorrência de eventos que alteram de forma discreta instantânea o estado do sistema (MIYAGI, 1996).

Para a modelagem de SEDs, a aplicação de ferramentas como a Rede de Petri e suas variações como *Production Flow Schema* (PFS) e *Mark Flow Graph* (MFG) são formas de auxílio no desenvolvimento de sistemas de controle e automação.

A utilização da técnica de PFS no contexto da I4.0 pode auxiliar no mapeamento das operações e interações entre os elementos do sistema, uma vez que a dinâmica de interação pode ser classificada com um SED. Neste trabalho o PFS é utilizado a fim de se indicar as operações e suas relações ao longo das camadas do RAMI4.0.

3.6.1 Production Flow Schema

O PFS (*Production Flow Schema*) é uma técnica indicada para aplicação em diferentes níveis de modelagem, análise e controle de SEDs (MIYAGI, 1996).

No PFS, os eventos são indicações de determinadas atividades, que por sua vez podem incluir vários outros eventos e estados organizados hierarquicamente.

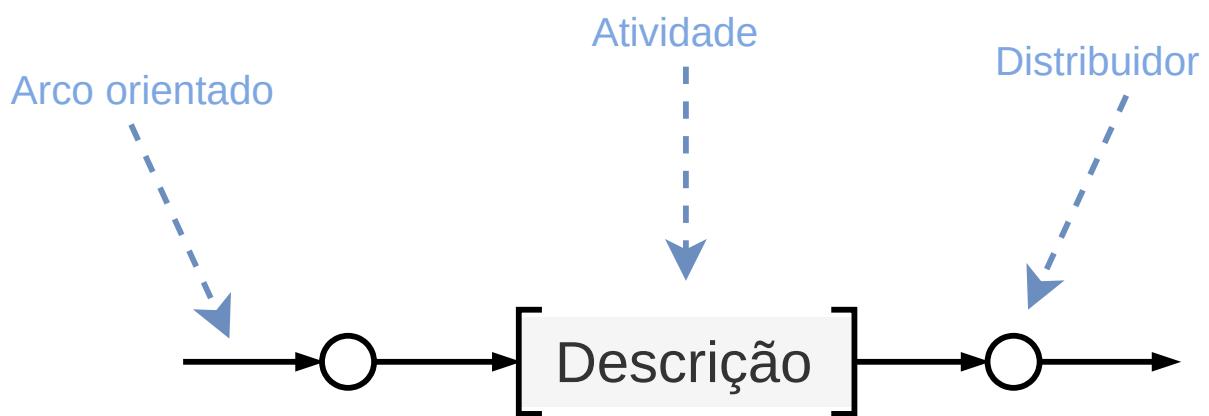
Por meio de modelos em PFS, é especificada a estrutura da arquitetura apresentada, indicando assim as interações de seus componentes. Além disso, com o PFS, os fluxos das operações podem ser descritos de forma desacoplada de qualquer tecnologia necessária para a implementação do sistema (PISCHING et al., 2018a).

Em um PFS deve haver a representação dos eventos discretos, portanto, qualquer processo produtivo representado em PFS apresentará os seguintes elementos estruturais:

- Atividades: Representação dos componentes ativos;
- Distribuidores: Representação dos componentes passivos;
- Arcos orientados: Representação das relações entre os componentes ativos e passivos.

A [Figura 24](#) descreve os elementos do PFS e sua representação gráfica.

Figura 24 – Elementos do PFS.



Fonte: [Pisching et al. \(2018b\)](#) (adaptado).

A atividade corresponde à realização de certas unidades ou conjuntos de operações, como um processamento, uma montagem, desmontagem, etc. Os distribuidores correspondem ao lugar de entrada e saída de itens ou a transição entre as diferentes atividades. Já os arcos orientados indicam a direção dos fluxos e a relação entre os eventos.

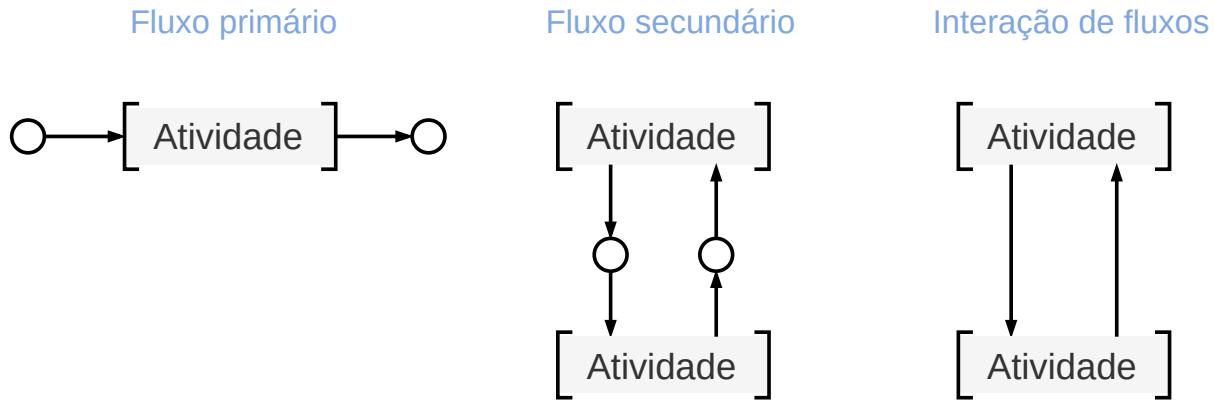
Os arcos conectando a parte externa das atividades (horizontalmente) indicam um fluxo principal (primário), já os arcos conectando a parte interna da atividade (verticalmente) indicam um fluxo secundário ([MIYAGI, 1996](#)).

Um terceiro tipo de fluxo é usado para representar a integração entre interfaces das atividades e é indicado por meio de um arco conectando diretamente duas atividades. O arco indicador de interação de fluxo é usado para modelar interações entre diferentes níveis, como operações de solicitação e resposta ([PISCHING et al., 2018b](#)).

Os tipos de fluxo na representação em PFS é mostrada na [Figura 25](#).

Os fluxos de processo do sistema em PFS são modelados por meio de uma abordagem *top-down*, assim os resultados podem ser refinados sucessivamente detalhando-se a cada iteração a atividade representada. A modelagem do sistema em PFS, portanto, parte de um alto nível de abstração, seguido de sucessivos refinamentos detalhando o modelo a cada nível.

Figura 25 – Tipos de fluxo no PFS.



Fonte: Pisching et al. (2018b) (adaptado).

Desta forma, o PFS representa uma linguagem de alto nível independente de tecnologias e fabricantes para modelar os processos do sistema. A relevância de se adotar uma linguagem natural para a representação do sistema como o PFS está na padronização da comunicação com especialistas de diferentes áreas, como arquitetos, engenheiros e *designers*. Assim, há uma efetiva comunicação sobre a interação entre as partes de um sistema e sobre os fluxo de elementos e operações em diferentes níveis do sistema em análise, como, por exemplo, produtos, ordens de serviço, máquinas, informações de sensores, etc.

4 Arquitetura para compartilhamento de informações do ativo

A elaboração de uma arquitetura comum para o compartilhamento de informações do ativo é essencial para que haja consistência e interoperabilidade entre os membros da Cadeia de Suprimentos (CS) adotando este sistema.

Este capítulo tem o objetivo de apresentar detalhes da arquitetura proposta baseada em *Web Services* (WS) nos modelos de uma arquitetura orientada a serviços (SOA) compatível com Componentes I4.0 para o compartilhamento de informações do ativo ao longo da CS. A fim de simplificação do texto, os *Web Services* serão mencionados apenas como “serviços”.

Neste capítulo é apresentado também o mapeamento dos componentes desta arquitetura dentro do eixo camadas do RAMI4.0.

4.1 Componentes e operações de serviços dos AASs

Os serviços no escopo desta arquitetura são representações das funcionalidades dos Componentes I4.0 e são fornecidos e consumidos entre *Asset Administration Shells* (AASs).

A lógica de fornecimento e consumo de serviços proposta para a I4.0 segue os moldes de um *Web Service* explicado na [seção 3.5](#), apresentando os componentes e operações (vide ??) adaptados ao AAS.

Esta arquitetura envolve três componentes (atores) básicos: O AAS cliente, o AAS servidor e o AAS repositório; e três operações: publicação, busca e interação.

Os serviços disponibilizados remotamente pelo AAS servidor escuta e responde solicitações de clientes por meio de uma determinada rede e porta. Os AAS clientes, por sua vez, consomem o serviço disponibilizado pelo servidor por meio de solicitações.

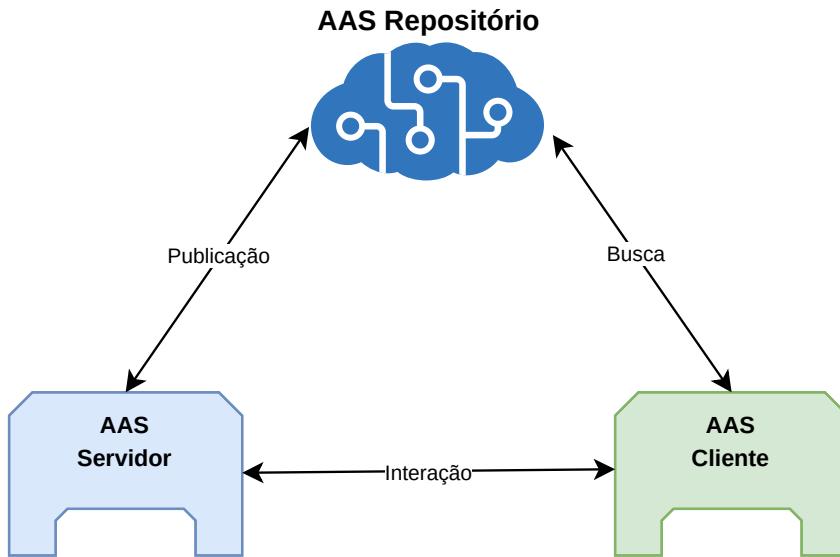
Nesta seção são apresentados detalhes sobre os componentes e operações necessárias para o fornecimento serviços no mundo conectado da I4.0.

4.1.1 Componentes

Os componentes da arquitetura e suas inter-relações são apresentados na [Figura 26](#).

De maneira sucinta, os componentes são descritos da seguinte forma: “O AAS Servidor” é a parte que possui um serviço a oferecer para os demais AASs no mundo conectado, o “AAS Cliente” é a parte que necessita de um serviço e que age ativamente

Figura 26 – Componentes e operações do WS.



Fonte: O autor.

para receber este serviço e o “AAS Repositório” é a parte que armazena informações sobre descrições de diversos serviços.

A [Tabela 4](#) lista os componentes da arquitetura para a I4.0 e suas respectivas descrições detalhadas.

Tabela 4 – Componentes da arquitetura para a I4.0.

Componente	Descrição
AAS Servidor	O AAS Servidor é a conexão direta com o ativo. Este AAS extrai as informações sobre seu ativo para sua própria MDP para que assim possam ser disponibilizadas na rede. Cada submodelo do AAS representa um conjunto de informações e serviços semelhantes agrupados.
AAS Cliente	O AAS Cliente é a parte que irá consumir as informações disponibilizadas pelo AAS Servidor. O cliente representa cada uma das partes envolvidas na cadeia de suprimentos. Pode representar uma instituição, uma pessoa física ou até mesmo uma outra máquina/produto.
AAS Repositório	O repositório é o componente que recebe, armazena e disponibiliza informações de descrição sobre todos os serviços disponíveis no mundo conectado. O AAS recebe operações de “publicação” por parte do AAS Servidor e operações de “busca” por parte do AAS Cliente. O Repositório não atua como canal de comunicação entre AAS Cliente e Servidor, mas apenas fornece informações necessárias para que ambos os AAS possam se comunicar diretamente por meio da operação de “interação”.

Fonte: O autor.

Neste modelo, a descrição dos serviços disponíveis nos submodelos de cada AAS

é armazenada em um repositório comum, onde todos os AASs disponíveis no mundo conectado na I4.0 poderiam se tornar visíveis. A função do repositório é armazenar uma descrição dos serviços disponíveis e não o serviço em si. O serviço é fornecido pelo próprio AAS Servidor que o disponibilizou, servindo o repositório apenas como um elemento para a descoberta de serviços.

Cada AAS pode atuar tanto como um fornecedor de serviços (servidor), quanto como um solicitante de serviços (cliente), ou como ambos. Sempre usando o repositório como meio para a publicação ou busca dos serviços.

4.1.2 Operações

As operações de serviços de AASs e suas inter-relações com os componentes são mostradas por meio dos arcos na [Figura 26](#) e suas descrições detalhadas são apresentadas na [Tabela 5](#)

Tabela 5 – Operações do WS para a I4.0.

Operação	Descrição
Publicação	Ação tomada pelo AAS Servidor sempre que este componente queira anunciar um serviço para que possa ser descoberto. Nesta operação, o AAS Servidor envia uma lista de seus serviços ofertados e a descrição de cada um desses serviços. Esta lista é recebida e armazenada pelo AAS Repositório, que a disponibiliza para acesso público.
Busca	Ação tomada pelo AAS Cliente sempre que este precisa consultar serviços de seu interesse. Nesta operação o AAS Cliente faz uma solicitação ao AAS Repositório com os parâmetros que definem o tipo e as restrições do serviço desejado. A operação de busca engloba também o fluxo contrário de informações, que é o envio da resposta da solicitação do AAS Repositório para o AAS Cliente.
Interação	Ação tomada pelo AAS Cliente sempre que este deseja invocar um serviço. O AAS Cliente estabelece uma conexão direta com o AAS Servidor e consome o determinado serviço solicitado. A operação de interação normalmente é feita após o recebimento da lista de descrição de serviços por parte do AAS Repositório, porém a interação pode ser feita diretamente caso o AAS Cliente já possua informações necessárias para o estabelecimento da conexão.

Fonte: O autor.

Para cada uma das operações, deve ser definido também o WSD (*Web Services Description*), documento o qual estabelece os padrões de comunicação suportados pelo AAS Servidor como, por exemplo, o padrão REST ou o padrão SOAP; e especifica como acessar e quais as operações ou métodos estão disponíveis no serviço.

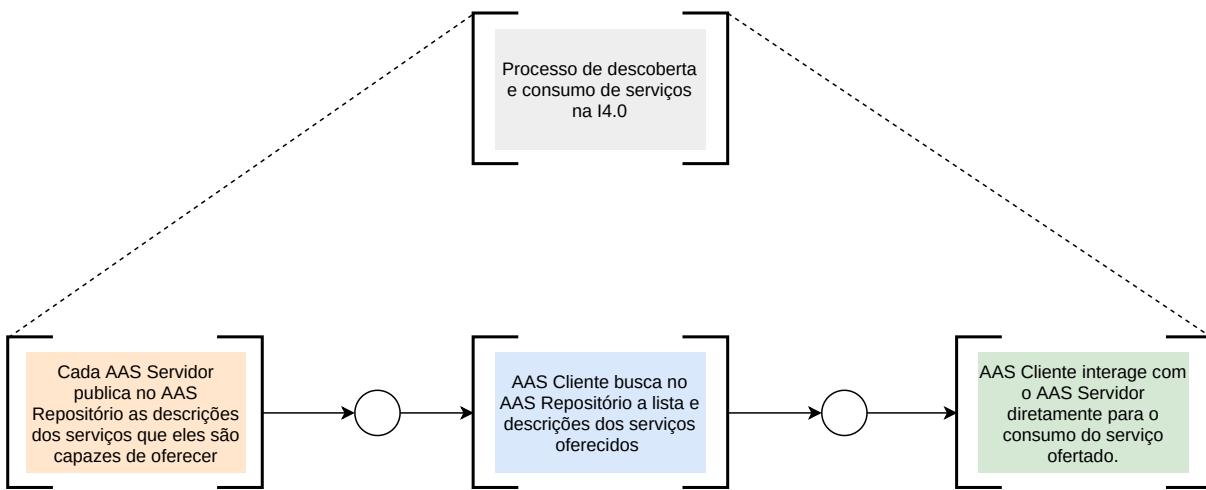
Quando o AAS atua como Servidor, este publica a descrição de seus serviços no repositório por meio de uma API (*Application Programming Interface*) definida no WSD.

Quando como Cliente, o AAS busca no repositório um serviço desejado e recebe uma lista de opções de serviços com suas respectivas descrições. Assim, o serviço mais adequado pode ser selecionado.

Uma vez definido o serviço a ser consumido, o AAS Cliente estabelecerá a conexão direta com o AAS Servidor por meio de algum dos padrões suportados, utilizando os detalhes contidos na descrição do serviço para localizar, contactar e invocar o serviço.

A [Figura 27](#) apresenta um diagrama PFS (*Production Flow Schema*) (vide [seção 3.6](#)), com o fluxo de ocorrência das operações básicas no WS para a I4.0.

Figura 27 – Diagrama PFS das operações do WS.



Fonte: O autor.

Os serviços fornecidos por um AAS são diversos. Entretanto, neste trabalho serão tratados com ênfase aqueles serviços que têm como objetivo o compartilhamento de informações sobre o ativo que possam agregar valor ao produto ao longo de sua cadeia de suprimentos. Ou seja, os serviços que extraem informações da MDP do AAS e as fornecem, mediante autenticação, às partes solicitantes ao longo da cadeia de suprimentos.

4.2 Estrutura do AAS

Nesta proposta de arquitetura de WS, o conceito de Memória Digital do Produto (MDP) é inserido dentro da Indústria 4.0 com o objetivo de se agregar valor ao produto por meio da possibilidade de acesso a informações sobre o ativo entre parceiros ao longo da cadeia de valor.

Nesta seção são apresentados os detalhes sobre uma possível estruturação do AAS para que seja compatível com a proposta de compartilhamento de informações por meio de WSs.

4.2.1 Integração da MDP ao AAS

A MDP precisa ser integrada ao AAS para que possa ter a estrutura necessária para que seus dados sejam disponibilizados ao mundo conectado da I4.0. A MDP em um AAS corresponde à organização dos dados do ativo, ao gerenciamento desses dados e às funções básicas aplicadas em cima desses dados. A MDP é uma *view*, ou seja, ela replica e agrupa as informações referentes a cada um dos submodelos de um AAS e as organiza de forma a poderem ser facilmente disponibilizadas por meio de WSs.

Como a MDP é parte integral do AAS, que representa a parte virtual do ativo, esta pode ser fornecida em qualquer meio digital, inclusive em plataformas de serviços de computação em nuvem. Estas plataformas específicas suportam o armazenamento de grandes quantidades de dados, assim como podem assegurar uma alta capacidade de processamento de requisições de serviços.

As informações contidas na MDP devem ser estruturadas de tal forma que simplifique a interpretação destes dados do lado do cliente. Para isso, metamodelos devem ser estabelecidos a fim de se criar moldes sobre os quais os dados devem ser estruturados.

Bader et al. (2019) estabelece padrões de metamodelos para a implementação de submodelos no AAS, porém não aborda um possível repositório de serviços e o armazenamento de descrições de serviços. A Tabela 6 traz uma proposta de metamodelo para a MDP do AAS Repositório para o armazenamento de descrições de serviços.

A Tabela 6 é uma lista não exaustiva das propriedades necessárias para o armazenamento de um serviço, ela apenas apresenta uma ideia sobre os tipos de chaves básicas necessárias para identificação e invocação de um serviço na rede.

O AAS Cliente na operação de busca fará uma requisição ao repositório ou a uma lista de repositórios e receberá (de cada um dos repositórios) por meio de uma API a lista de serviços com uma estrutura de dados contendo os atributos chave-valor mencionados na Tabela 6.

Já o metamodelo da MDP do AAS servidor possuirá uma estrutura diferente, uma vez que deverá possuir as funções de agregação necessárias para a geração de alguns atributos. Uma proposta de metamodelo para a MDP do AAS servidor é apresentada na Tabela 7.

A Tabela 7, assim como os metamodelos da MDP do Repositório (Tabela 6), faz uma listagem não exaustiva de suas propriedades, sendo possível a inserção de novas funcionalidades adicionais na implementação do AAS. O metamodelo proposto na tabela se relaciona às funções da MDP em gerar a descrição dos serviços. Além desta atividade, a MDP possui as funções convencionais de armazenamento e gerenciamento dos dados dos submodelos.

Com a MDP, o AAS servidor será, portanto, o único responsável pela geração e atualização de todos os metadados referentes aos serviços de seu AAS.

Tabela 6 – Proposta de metamodelo para a MDP do repositório.

Propriedade	Descrição
ID do AAS servidor	Tem a função de distinguir exclusivamente os AASs provedores de serviços e todos seus elementos (ADOLPHS et al., 2016) no mundo conectado da I4.0. Alguns tipos possíveis de identificadores são (BADER et al., 2019): IRDI, IRI e UUID. O ID do AAS servidor é uma referência ao AAS Repositório e a todos os demais AASs que solicitarem a descrição dos serviços.
ID do serviço	Identificação exclusiva do serviço para a sua identificação única entre todos os repositórios. O ID do serviço pode ser derivado do próprio ID do AAS servidor com identificações extra do ID dentro do AAS (E.g., ID_MODELO.SERVIÇO_001).
Descrição do AAS provedor	Breve descrição sobre o AAS servidor e suas funções.
Protocolos de comunicação e padrões de API	Definição dos protocolos de comunicação suportados pelo fornecedor daquele serviço, como, por exemplo, HTTP, MQTT, etc; assim como as especificações do padrão para a comunicação via API como, por exemplo, REST, SOAP, GraphQL, etc.
Formato de intercâmbio	Formato de arquivo de intercâmbio de informações. Ex.: json, xml, yaml, aasx, etc.
<i>Timestamp</i> da inserção do serviço no repositório	Data e hora de inserção do serviço ao repositório.
Indicação de disponibilidade	Chave booleana indicando se o AAS servidor atualmente suporta requisições. Esta propriedade pode estar desatualizada caso o AAS Servidor sofra uma falha de comunicação. Em outros casos, o AAS Servidor pode voluntariamente indicar ao repositório que temporariamente não processará solicitações de serviços.
Quality of Service (QoS)	A métrica de qualidade de serviço (QoS) fornece indicadores sobre a qualidade do serviço prestado por um determinado AAS. O tempo médio de resposta do serviço baseado no tempo de resposta observado por diversas requisições executadas e a disponibilidade do AAS quando solicitado são índices que contribuição do QoS. Um índice para serviços de qualidade mais subjetiva pode ser criado baseado em avaliações de AAS Clientes que já consumiram o serviço.
Descrição do serviço	Descrição sobre o funcionamento do serviço juntamente com o tipo de resposta esperado.

Fonte: O autor.

4.2.2 Detalhamento das partes do AAS

Nesta subseção é apresentada uma proposta de detalhamento dos elementos de um AAS contendo todas as partes necessárias para a implementação da arquitetura de compartilhamento de serviços baseada no RAMI4.0.

A estrutura proposta do AAS é baseada em Bader et al. (2019), que estabelece a divisão do AAS em submodelos e o divide em duas partes: o cabeçalho (*header*) e o corpo

Tabela 7 – Proposta de metamodelo para a MDP do servidor.

Propriedade/Função	Descrição
ID do serviço	Identificação exclusiva do serviço para a sua identificação única entre todos os repositórios.
Extração de dados dos submodelos	Função que retorna os dados solicitados pelo serviço.
Organização dos dados	Funções de estruturação dos dados ao formato solicitado pelo serviço, nesta fase pode haver também funções de limpeza dos dados brutos extraídos dos submodelos.
<i>Quality of Service</i> (QoS)	Função para cálculo e armazenamento do índice de qualidade de serviço (QoS) com base em métricas sobre serviços já prestados e avaliações de AAS clientes que já consumiram o serviço.
Atualização da descrição do serviço no repositório	Função que envia ao repositório da empresa a descrição atualizada dos serviços.
Repositório	Referência ao repositório da empresa onde o ativo se encontra.

Fonte: O autor.

(body).

O cabeçalho na estrutura proposta terá a função de providenciar informações públicas sobre o ativo que o identifiquem minimamente e que forneça uma descrição sobre seus serviços oferecidos. O cabeçalho deverá conter informações que podem ser acessadas sem a necessidade de autenticação, como, por exemplo, seu identificador único universal (UUID - *Universal Unique Identifier*), o modelo e fabricante do ativo. O cabeçalho deverá conter também a descrição dos serviços fornecidos por seus submodelos. A descrição dos serviços é enviada ao repositório ou pode ser também consultada diretamente pelo AAS solicitante.

A descrição de cada serviço no cabeçalho deverá conter também referências ao próprio AAS como forma de referência para que, assim, o AAS Cliente possa localizar, contactar e invocar o serviço ofertado.

O cabeçalho não terá a função de fornecer uma ficha técnica detalhada, mas apenas uma caracterização abstrata do ativo. O cabeçalho deverá necessariamente conter o UUID do AAS, sem o UUID o AAS se torna inacessível para qualquer uma das partes da cadeia de suprimentos.

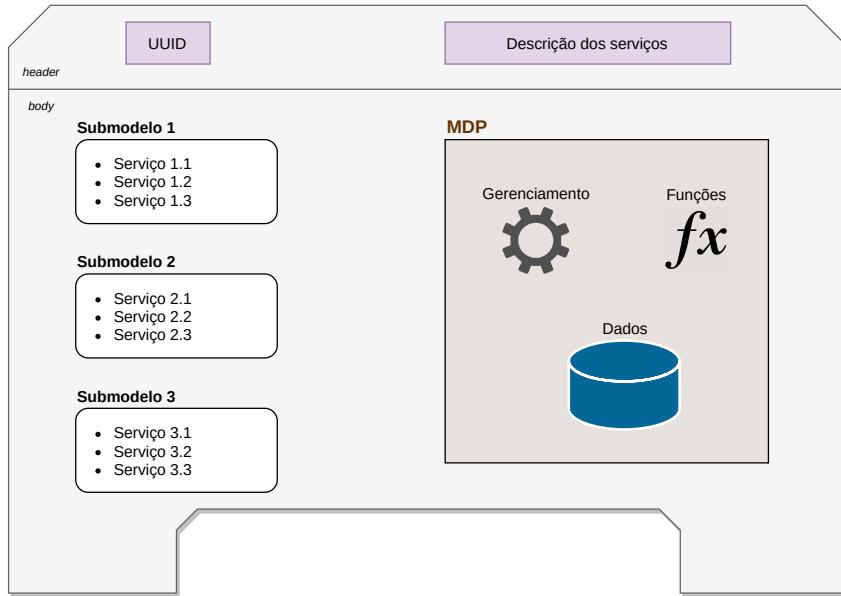
Dentro dos moldes da estrutura proposta, o corpo (*body*) de um AAS fornece as informações e funcionalidades sensíveis sobre o ativo, que podem ser acessadas mediante autenticação. As funcionalidades dos ativos são agrupadas em forma de submodelos, conforme estabelecido em Bader et al. (2019), Adolph et al. (2018), Bedenbender et al. (2017), que são unidades de agrupamento de funcionalidades semelhantes, como propriedades, serviços e demais regras de negócio do ativo. Os dados do ativo são armazenados nos próprios submodelos, enquanto a MDP (que também está contida no corpo do AAS) extrai

e organiza as informações dos submodelos de forma a estruturá-las para serem diretamente fornecidas ao serviço.

O corpo do AAS representa a carga útil (*payload*) do AAS, pois é a porção de informação que é de fato relevante para o cliente que consumirá os serviços ofertados.

A estrutura de um AAS compatível com a arquitetura orientada a serviços proposta é apresentada na [Figura 28](#).

Figura 28 – Estrutura do AAS com seus submodelos e a MDP.



Fonte: O autor.

Os dados contidos nos submodelos, quando processados pela MDP, fornecem informações úteis sobre o ativo e agregam valor ao mesmo. Além disso, novos modelos de negócio surgem sob os dados gerados pelo ativo.

Neste trabalho é dado enfoque aos submodelos que se relacionam a informações sobre o produto que sejam de interesse a qualquer uma das partes ao longo da cadeia de suprimentos e que possam ser lidos ou escritos por meio dos WSs. Alguns exemplos desse tipo de submodelo podem incluir: a ficha técnica detalhada do ativo, submodelos de histórico de leitura de sensores, histórico de leitura de geolocalização (GPS), histórico de padrões de uso, etc.

4.3 Fluxo de fornecimento de serviços

As etapas para o fornecimento de serviços na I4.0 segue um fluxo padrão. Os submodelos agregam informações semelhantes que podem ser lidas ou escritas por qualquer uma das partes ao longo da CS mediante autenticação.

Um fluxo de leitura/escrita de dados pode ser exemplificado com uma CS simples contendo três membros: um fabricante, um distribuidor e um consumidor; cada membro da

CS é AAS Cliente diferente. O fabricante cria o produto, que será o AAS Servidor, e define a estrutura de seu AAS e seus submodelos necessários, três submodelos são definidos: submodelo “Geolocalização”, submodelo “Sensores” e submodelo “Documentação”. Ao longo do ciclo de vida do produto, os membros da CS (fabricante, distribuidor e consumidor) podem interagir com esses submodelos, fazendo sua leitura para o caso dos submodelos de geolocalização e sensores, e podendo fazer a leitura e/ou escrita para o caso do submodelo de documentação.

A [Figura 29](#) demonstra este cenário mencionado com o fluxo de operações básicas do WS em funcionamento. Neste exemplo, o AAS de um produto (**a**) mantém contato com o AAS da empresa do fabricante (**b**), com o AAS da empresa do distribuidor (**c**) e com o AAS do consumidor final (**d**), fornecendo o serviço de consulta de informações de diferentes submodelos para cada um dos solicitantes.

Na [Figura 29](#) são mostrados os três modelos dos AAS Produto: Submodelo “geolocalização” (**e**), submodelo “sensores” (**f**) e submodelo “documentação” (**g**). Os serviços de todos os submodelos disponíveis são mapeados pelas funções da MDP (**h**) e, assim, é gerada uma lista de descrições de serviços (**i**). Esta lista de descrições de serviços é publicada (**j**) no repositório.

O repositório (**k**) recebe a descrição de serviços do AAS Produto e as disponibiliza para consulta. O repositório receberá também listas de descrição de serviços de diversos outros AASs.

Os AAS Clientes fazem a busca (**l**) no repositório. As buscas são feitas com parâmetros a fim de se restringir qual tipo de serviço aquele cliente pretende consumir, podendo-se restringir a busca, inclusive, ao serviço de um AAS específico, identificando-o por meio de seu UUID.

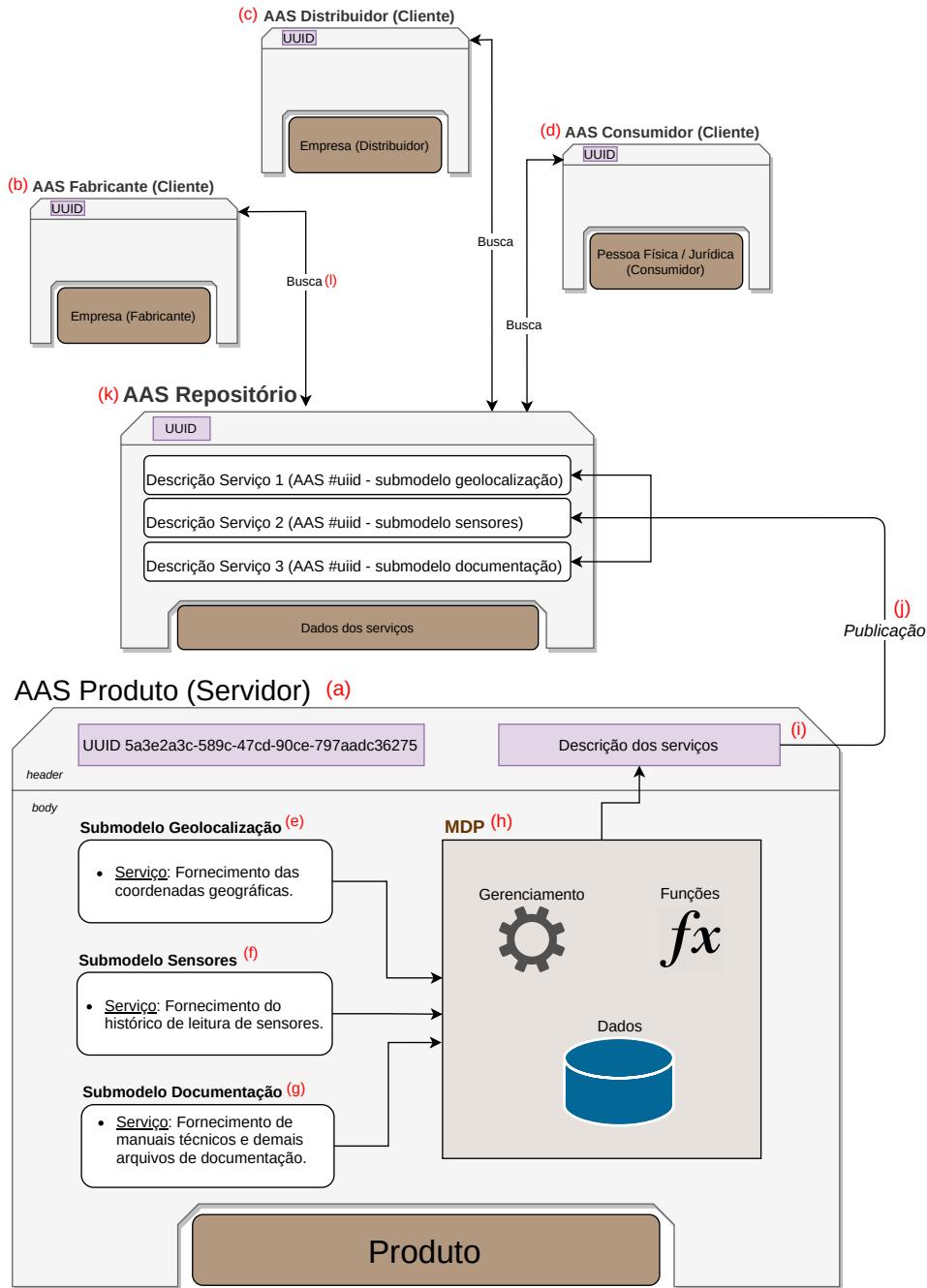
Cada AAS Cliente (Fabricante, Distribuidor ou Consumidor), portanto, realiza a consulta ao AAS Re却tório com os seus parâmetros de interesse e recebe a resposta com descrições detalhadas sobre os serviços disponíveis e informações para localizar, contactar e invocar estes serviços.

O próximo passo após o recebimento da resposta do repositório é a decisão interna de cada AAS Cliente sobre qual serviço selecionar. Uma vez definido, o AAS Cliente estabelece uma comunicação direta com o AAS Servidor (produto) para o consumo do serviço selecionado.

Este é um exemplo de consulta única. Em aplicações reais, o cliente normalmente invocaria o serviço de diversos AAS Servidores ao mesmo tempo, como, por exemplo, um fabricante solicitando informações de todas as máquinas de um modelo específico que foram vendidas a clientes espalhados pelo mundo para se realizar análise de dados a fim de se fazer uma manutenção preditiva por meio da identificação de potenciais falhas. Tal exemplo é demonstrado na [Figura 30](#).

A [Figura 30](#) demonstra a situação de uma consulta de um AAS Cliente em múltiplos

Figura 29 – Exemplificação das operações de publicação e busca com múltiplos clientes.

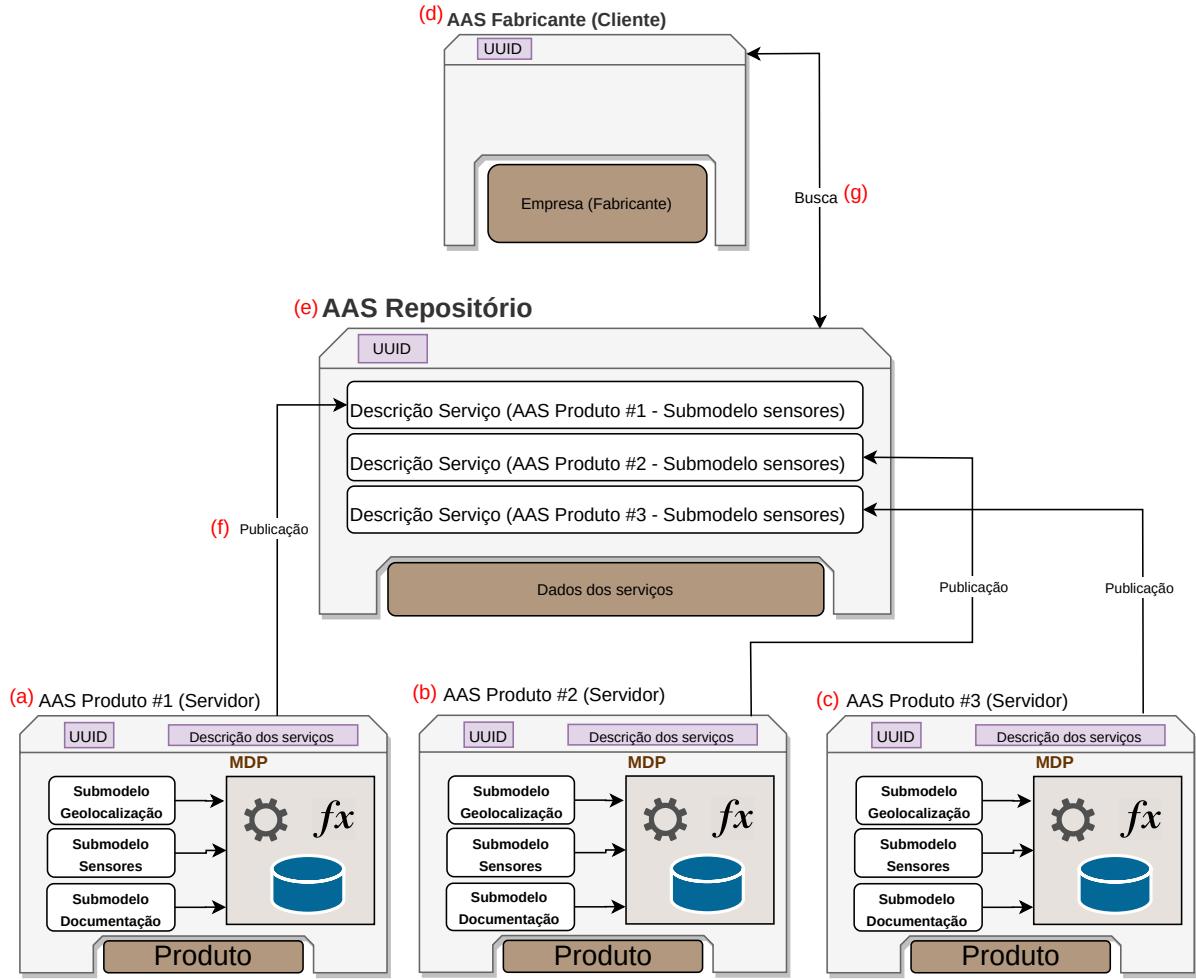


Fonte: O autor.

produtos. Neste exemplo, cada AAS Produto (**a**, **b** e **c**) realiza uma operação de publicação (**f**) no AAS Repositório (**e**).

O AAS Servidor (Fabricante) (**d**) por sua vez faz uma busca no AAS Repositório especificando os parâmetros que restrinjam a pesquisa a somente determinados modelos de produtos e recebe como resposta todas as descrições dos serviços que correspondem aos critérios de busca.

Figura 30 – Exemplificação das operações de publicação e busca com múltiplos produtos.



Fonte: O autor.

Todas as atividades de invocação de serviços na fase de interação são feitas mediante autenticação. É responsabilidade das funções da MDP realizar a autenticação ou bloqueio dos serviços disponíveis de acordo com as políticas de acesso de cada AAS.

É importante notar que no mundo da I4.0 todo ativo é englobado por um AAS e se torna um Componente I4.0. Como o repositório detém informações e funções que agregam valor ao negócio, este pode também ser considerado um ativo e, portanto, possui o seu próprio AAS, que é responsável por toda a parte virtual deste ativo.

4.4 Mapeamento das operações no RAMI4.0

Segundo IEC (2017), o RAMI4.0 fornece uma visão estruturada dos principais elementos de um ativo usando um modelo de níveis composto por três eixos. Desta forma, inter-relações complexas podem ser divididas em seções menores e mais gerenciáveis,

combinando os três eixos para representar cada aspecto relevante do estado do ativo em cada ponto de seu ciclo de vida.

Esta seção tem o objetivo de mapear as operações do WS para dentro das camadas do RAMI4.0 de forma a representar todas as etapas do fluxo de informações em um modelo unificado.

O mapeamento para o RAMI4.0, que é uma arquitetura de referência para a I4.0, contribui para facilitar a execução de implementações de conceitos de I4.0 uma vez que estabelece um padrão de arquitetura que deve ser adotado por todos, garantindo a interoperabilidades entre os sistemas.

4.4.1 Descrição das camadas do RAMI4.0

Na [subseção 3.1.1](#) foram apresentados os detalhes do RAMI4.0 e o detalhamento de cada nível do eixo Camadas com suas funções gerais. Nesta subseção é apresentada cada camada com enfoque para suas funções específicas para as operações em um WS.

A camada mais inferior, **Ativo** é onde estará o elemento real do Componente I4.0 (C4.0) como, por exemplo, máquinas, sensores, pessoas, etc; e qualquer outro elemento, físico ou não, que represente valor ao negócio. O ativo será a fonte de dados, os quais serão compartilhados por meio de serviços para as partes ao longo da cadeia de suprimentos.

Para o compartilhamento de informações do produto no mundo I4.0, os dados a serem extraídos do ativo são estrategicamente selecionados como o objetivo de reunir somente os dados que possam agregar valor ao próprio ativo. Assim, estes dados selecionados são extraídos do ativo e repassados às camadas superiores até que cheguem na camada Informação, onde são armazenados nos submodelos.

Cada elemento desta camada, os ativos, deve possuir meios de comunicação e identificadores únicos (UUID), para permitir o seu monitoramento e supervisão dos dispositivos de controle por meio do AAS ([ADOLPHS et al., 2015](#)).

Na arquitetura orientada a serviços, três tipos de ativos básicos podem ser elencados: o produto, que é a fonte de dados e fornecedor dos serviços (servidor); as empresas ou pessoas, que são os clientes que consomem as informações da MDP do produto e também podem alterá-la; e as descrições dos serviços (WSD), que é o ativo encapsulado pelo C4.0-Repositório, responsável por garantir a visibilidade de um produto na cadeia de suprimentos.

Na camada **Integração** estão as funcionalidades responsáveis pela virtualização de todos os ativos da camada inferior ([ADOLPHS et al., 2015](#)). Ela representa a ponte para a troca de informações entre o mundo real e o virtual.

Na arquitetura proposta para o compartilhamento de informações do ativo, esta camada está presente no CI4.0-Servidor, pois é dele que serão extraídos os dados desde o ativo até as camadas superiores. Tanto o C4.0-Cliente quanto o C4.0-Repositório operam primariamente nas camadas virtuais, porém também possuem a camada Integração, que

faz a conexão com a empresa e o WSD, respectivamente. Esta camada adotará alguma tecnologias para a transferência de dados por meio físico como, por exemplo, o Wi-Fi, Ethernet, 5G, Bluetooth, etc.

A camada **Comunicação** estabelecerá o protocolo de comunicação OPC UA para o C4.0-Servidor se comunicar com os demais C4.0s dentro da própria empresa (integração vertical).

Para a arquitetura de compartilhamento de informações de ativos, não haverá comunicação entre C4.0s dentro da própria empresa uma vez que todas as operações de um WS (publicação, busca e interação) ocorrem entre componentes de organizações distintas. Ainda assim esta camada é necessária uma vez que ela define também os padrões de comunicação entre as camadas de um mesmo AAS.

A camada de **Informação** é onde os dados são de fato armazenados. Para isso, modelos de estrutura de Banco de Dados (BD) são definidos de acordo os tipos de dados e suas aplicações. Alguns exemplos de estrutura de dados incluem: BDs relacionais (e.g., MySQL, Postgres, SQLite) ([MORRIS, 2017](#)) e demais BDs NoSQL como os orientados a documentos (e.g., MongoDB, CouchDB), os do tipo chave-valor (e.g., Redis, DynanoDB), os de armazenamento em coluna ampla (e.g., Cassandra, HBase) e os baseados em grafos (e.g., Neo4j, JanusGraph) ([SCHAEFER, 2019](#)).

Desta forma, esta camada é responsável por gerar e armazenar o WSD dos serviços oferecidos por cada C4.0-Servidor. Além disso, esta camada contém a parte da MDP que realiza a autenticação dos C4.0s solicitantes, ou seja, realiza o controle de acesso a suas informações.

Na camada **Funcional** é onde ocorre toda a interação horizontal com C4.0s contidos no mundo conectado da I4.0. Esta camada é responsável pela integração horizontal entre as partes da cadeia de suprimentos de um produto. Os serviços são disponibilizados por meio da camada funcional, portanto é a interface entre os C4.0s de diferentes empresas.

Esta camada deve definir o tipo de protocolo a ser utilizado para o fornecimento dos *Web Services*, o protocolo HTTP é o mais comumente adotado para o fornecimento de WSs ([GRÜNER; PFROMMER; PALM, 2016](#)). Outros protocolos de aplicação também podem ser adotados como, por exemplo, o MQTT ([YOKOTANI; SASAKI, 2016](#)).

O fornecimento de serviços ao longo da cadeia de suprimentos é considerado uma integração horizontal uma vez que cada parte da CS representa uma organização diferente. Para o fornecimento e consumo desses serviços de compartilhamento de informações, devem ser definidas também as especificações da API, ou seja, o padrão de requisição e resposta para o fornecimento e consumo de serviços como, por exemplo, o padrão REST.

A última camada, **Regra de Negócio**, é onde estão contidas as restrições legais e as políticas internas da empresa a serem aplicadas ao AAS ([ADOLPHS et al., 2015](#)). No contexto da arquitetura de compartilhamento de informações do ativo baseada em *Web Services*, esta camada conterá as restrições aplicadas sobre os serviços, como as políticas

de privacidade de dados (E.g., restrições de acesso a determinados serviços) e as restrições legais de cada país.

A regra de negócio estabelecerá quem na cadeia de suprimentos terá permissão para acessar quais informações do produto e quando. Um fabricante, por exemplo, terá acesso aos dados de padrões de uso de um produto somente sob a permissão do consumidor, o que representa uma regra nesta camada. Um distribuidor, por sua vez, só poderá ter acesso à localização do produto enquanto o produto estiver sob sua custódia.

Outro ponto relevante desta camada para a arquitetura de compartilhamento de informações ao longo da CS são as condições legais de cada país, que criam restrições sobre o fornecimento de serviços, principalmente no aspecto de governança de dados.

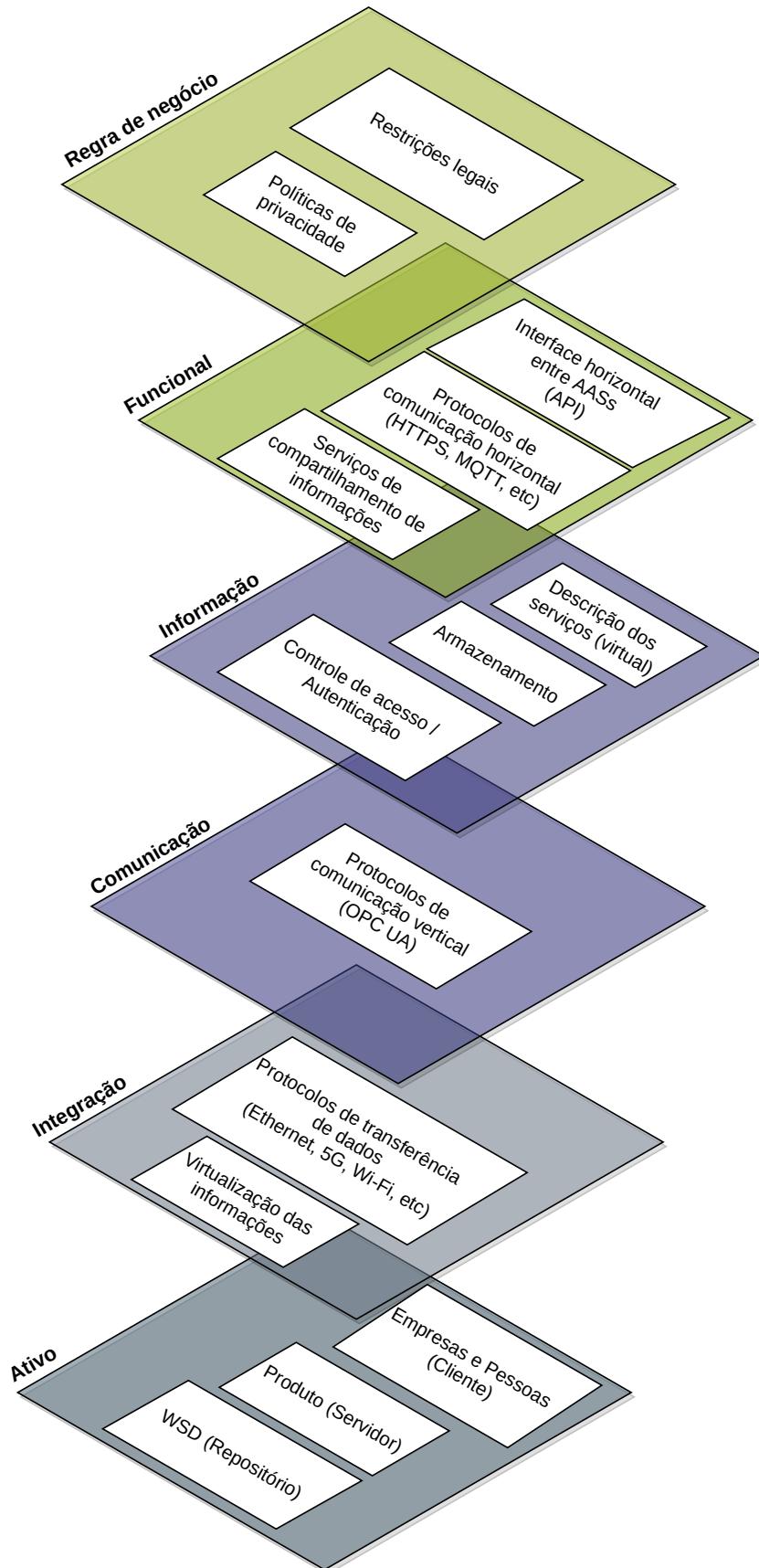
O conjunto de todas estas camadas representa um **Componente I4.0** (C4.0). Para cada tipo de operação relacionada a um componente, é necessário detalhar o fluxo de dados e de eventos acontecendo em cada uma das camadas. Este detalhamento permite que implementações de soluções I4.0 sejam facilitadas e garante que a criação dessas soluções por diversos desenvolvedores de sistemas resulte em sistemas que sejam interoperáveis, independentemente da tecnologia adotada.

O **Componente I4.0** pode ainda ser mais detalhadamente especificado, identificando se o componente representa um produto em desenvolvimento ou uma instância de um produto já fabricado. Estes detalhes são cobertos pelo eixo Ciclo de Vida e Cadeia de Valor e considerações sobre este eixo envolvendo a arquitetura proposta baseada em WSSs é apresentada no [Capítulo 5](#).

A [Figura 31](#) apresenta os componentes da arquitetura de fornecimento de WSSs dentro do eixo Camadas do RAMI4.0, que são:

- **Ativo:** Pessoas e empresas (cliente), produtos (servidor) e WSDs (repositório);
- **Integração:** Virtualização das informações, protocolos de transferência de dados (Ethernet, 5G, Wi-Fi, etc);
- **Comunicação:** Protocolos de comunicação vertical (OPC UA);
- **Informação:** Controle de acesso / autenticação, análise de dados, armazenamento, descrição dos serviços (virtual);
- **Funcional:** Serviços de compartilhamento de informações, protocolos de comunicação horizontal (HTTPS, MQTT, etc), interface horizontal entre AASs;
- **Regra de negócio:** Restrições legais, políticas de privacidade.

Figura 31 – Camadas do RAMI4.0 com os elementos da arquitetura.

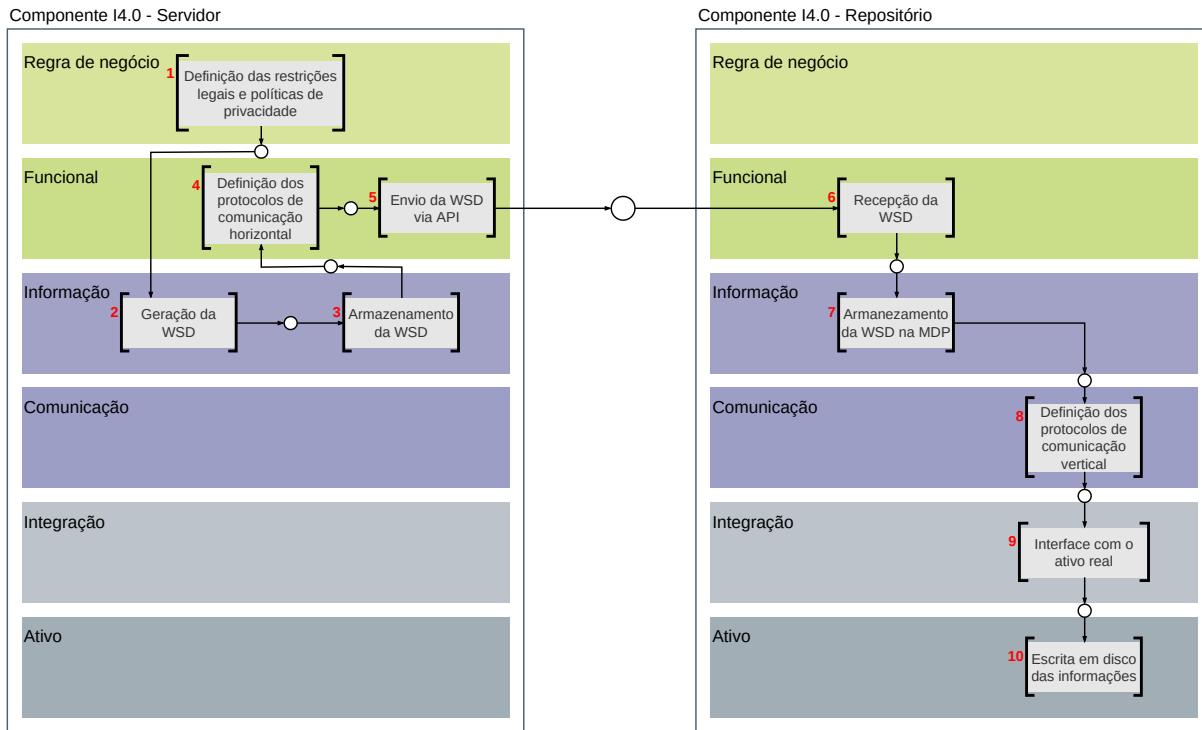


Fonte: O autor.

4.4.2 Operação de Publicação

A Figura 32 apresenta diagramas PFS do fluxo de atividades para a operação de publicação de um C4.0-Servidor em um C4.0-Repositório.

Figura 32 – Diagrama PFS da operação de publicação.



Fonte: O autor.

Esta operação é iniciada pelo C4.0-Servidor, seguindo um fluxo de atividades estabelecido até chegar no ativo do C4.0-Repositório, os passos são detalhados a seguir:

1. As restrições legais e as políticas de privacidade para um determinado C4.0 são definidas e acessadas. Esta atividade adicionará restrições ao serviço a ser publicado. Estas restrições serão incorporadas à descrição de cada serviço a ser publicado.
2. A geração da lista de descrições de serviços (WSD) é feita com base nos serviços disponíveis no C4.0-Servidor e nas restrições impostas na atividade anterior. Uma descrição de cada serviço ativo é gerada em um formato de intercâmbio padronizado.
3. A MDP local componente armazena a lista de WSD nos submodelos.
4. São definidos os protocolos de comunicação a serem utilizados na integração horizontal, assim como a especificação do padrão de requisição e resposta da API e o formato de intercâmbio de informações.
5. A lista de WSD é enviada ao CI4.0-Repositório via API.

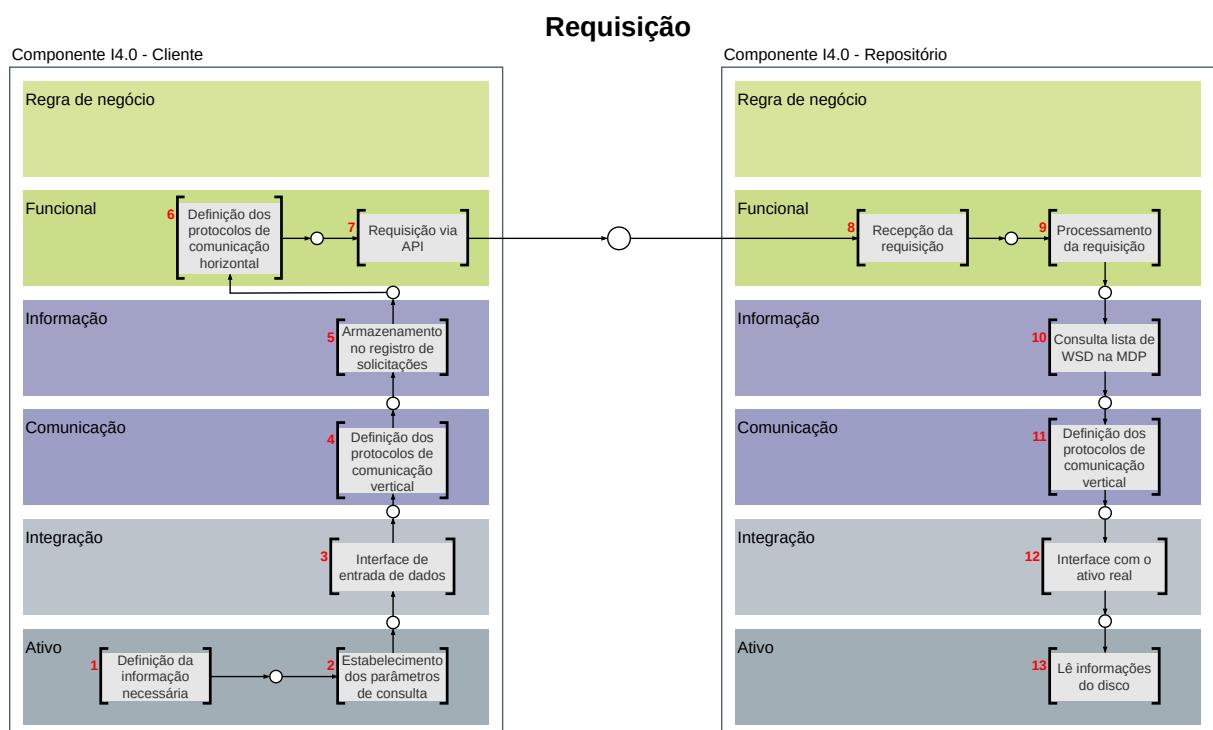
6. O C4.0-Repositório recebe a lista de WSD no formato de intercâmbio definido. A descrição dos serviços nesta fase já contém todas as informações para a identificação do serviço e de seu componente correspondente.
7. A lista de WSD é armazenada junto às demais descrições de serviços na MDP do C4.0-Repositório.
8. São definidos os protocolos de comunicação vertical para a comunicação com as camadas inferiores.
9. Os dados alimentam uma interface para comunicação com o ativo real.
10. Os dados são escritos em disco.

4.4.3 Operação de Busca

A operação de busca é dividida em duas partes: a requisição e a resposta. A requisição é a iniciativa do C4.0-Cliente para requerer a lista de WSD de um C4.0-Repositório. O fluxo de atividades da requisição em uma operação de busca é apresentado na [Figura 33](#).

Já a resposta da requisição em uma operação de busca é feita do C4.0-Repositório para o C4.0-Cliente e é apresentada na [Figura 34](#).

Figura 33 – Diagrama PFS da requisição em uma operação de busca.



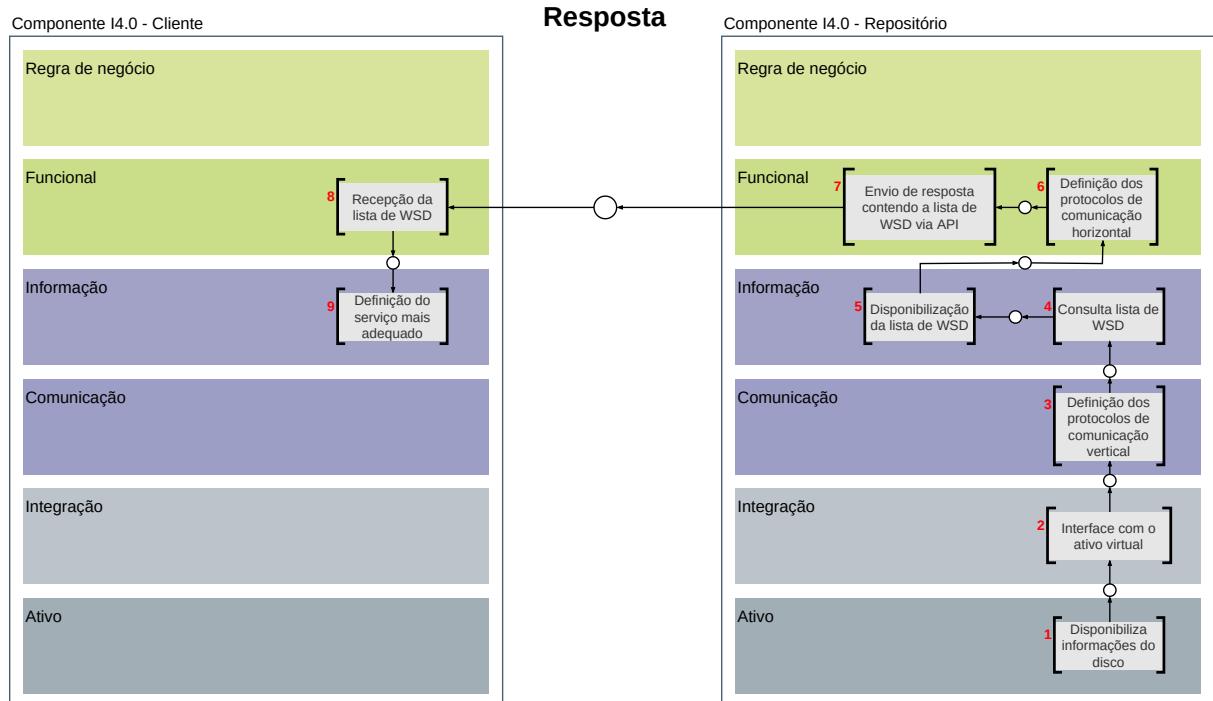
Fonte: O autor.

A operação de requisição para a busca de um serviço parte do C4.0-Cliente e segue um fluxo estabelecido até chegar ao C4.0-Repositório, esses passos são detalhados a seguir:

1. O processo de requisição começa com a definição por parte do ativo do C4.0-Cliente (pessoa ou empresa) da informação que se deseja consultar como, por exemplo, leituras de sensores, localização geográfica, manuais, etc. Essa definição pode ser manual, partindo da solicitação explícita de alguém, ou programática.
2. A partir do tipo de informação a ser consultada, define-se os parâmetros de consulta, que representam o conjunto de restrições que estabelecem qual é exatamente o tipo de serviço que o AAS Cliente deseja consumir. Para os serviços que visam a extração de informações do ativo, os parâmetros representam, por exemplo, o ID do provedor de serviços, o horário e data de um determinado evento, uma filtragem por modelos específicos de um produto, etc.
3. Os parâmetros de consulta alimentam uma interface para que a solicitação possa ser virtualizada e integrada ao AAS. Nesta atividade a intenção de solicitação de um serviço é virtualizada.
4. São definidos os protocolos de comunicação vertical para a comunicação com as camadas superiores.
5. A MDP local armazena os detalhes da solicitação em um registro de solicitações realizadas.
6. São definidos os protocolos de comunicação a serem utilizados na integração horizontal, assim como a especificação do padrão de requisição e resposta da API e o formato de intercâmbio de informações.
7. A requisição é enviada ao C4.0-Repositório via API.
8. O C4.0-Repositório recebe a solicitação e a insere ao final da lista de solicitações para ser processada.
9. A requisição é processada. Identifica-se nesta atividade se a requisição é válida e se ela contém todos os parâmetros necessários para a consulta.
10. A MDP realiza a consulta à lista de WSDs utilizando os parâmetros de consulta estabelecidos.
11. São definidos os protocolos de comunicação vertical para a comunicação com as camadas inferiores.
12. Estabelece-se uma interface para a interação entre o AAS e seu ativo real.
13. As informações solicitadas são lidas do disco e se tornam disponíveis para envio.

Após a requisição, o C4.0-Repositório envia a resposta ao C4.0-Cliente. O fluxo de atividades da resposta é apresentada em diagramas PFS na [Figura 34](#).

Figura 34 – Diagrama PFS da resposta em uma operação de busca.



Fonte: O autor.

Detalhadamente, a resposta do AAS Repositório segue o seguinte fluxo de atividades, começando pela disponibilização das informações reais do ativo repositório:

1. Os dados do ativo (WSD) são disponibilizados para consulta pelas camadas superiores.
2. Os dados disponibilizados são virtualizados para a integração com o AAS.
3. São definidos os protocolos de comunicação vertical para a comunicação com as camadas superiores.
4. É realizada a consulta da lista de WSDs. Os resultados podem ser uma lista de serviços válidos, assim como podem conter mensagens de erro devido a solicitações inválidas ou buscas retornando zero correspondências.
5. A lista de WSD é disponibilizada para acesso por parte da camada Funcional.
6. São definidos os protocolos de comunicação a serem utilizados na integração horizontal, assim como a especificação do padrão de requisição e resposta da API e o formato de intercâmbio de informações.
7. A resposta é enviada ao C4.0-Cliente via API.

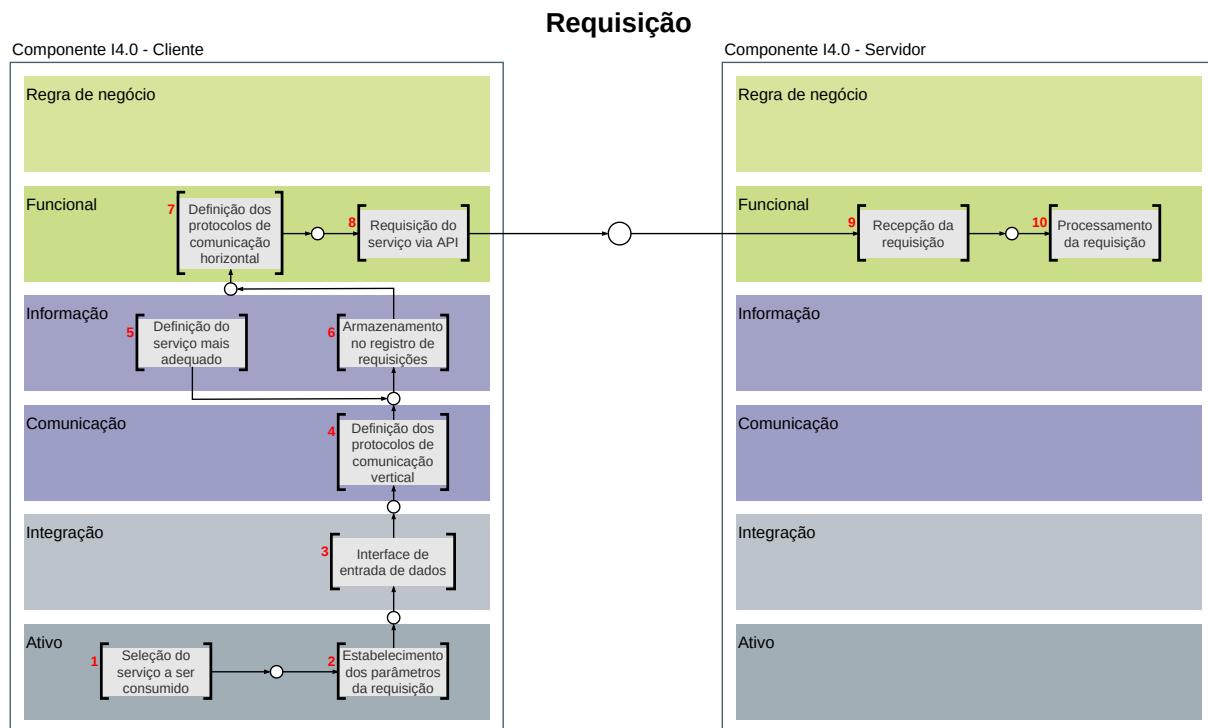
8. O C4.0-Cliente recebe a resposta contendo a lista de WSD em um formato de intercâmbio definido.
9. Após a recepção da lista de serviços disponíveis, é feito o processamento para a definição do serviço mais adequado. Em consultas a serviços de compartilhamento de informações esta fase é simplificada, uma vez que os próprios parâmetros de consulta na requisição já definem o serviço ideal que o cliente busca. A seleção do serviço mais adequado é baseada nos parâmetros definidos na operação de requisição, que estabelecem os requisitos do serviço.

4.4.4 Operação de Interação

A operação de interação é a fase final para o consumo de um serviço disponibilizado no mundo conectado da I4.0. Assim como a busca, a interação é dividida em requisição e resposta. Primeiramente, o C4.0-Cliente faz uma requisição de consumo de um serviço com parâmetros e então a requisição é processada e respondida pelo C4.0-Servidor.

A [Figura 35](#) apresenta o fluxo de atividades em uma requisição de um serviço e a [Figura 36](#) a resposta do serviço.

Figura 35 – Diagrama PFS da requisição de um serviço em uma operação de interação.



Fonte: O autor.

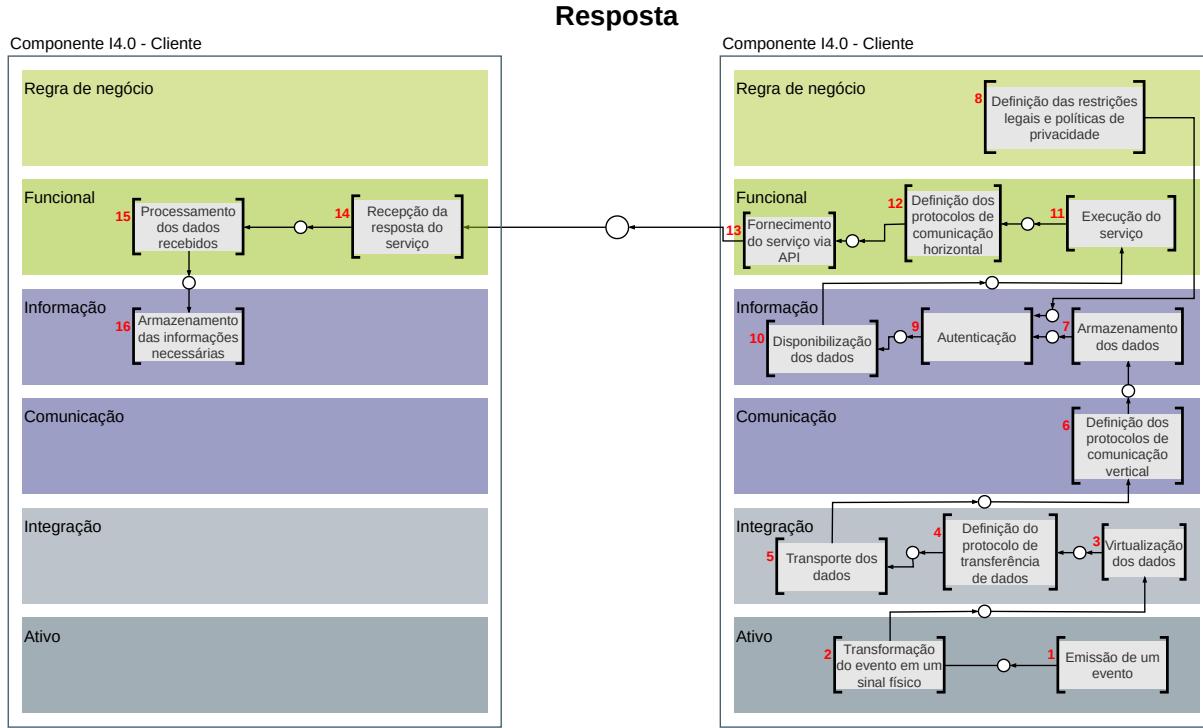
A requisição de um serviço na operação de interação é iniciada pelo C4.0-Cliente e é enviada diretamente ao C4.0-Servidor usando a WSD fornecida pelo C4.0-Repositório. O fluxo de atividades para a requisição de um serviço é detalhada a seguir:

1. O processo de requisição começa com a definição exata sobre qual serviço de qual C4.0 será consumido. Caso a decisão seja feita manualmente, a intenção de requisição começa pelo ativo do C4.0-Cliente (pessoa ou empresa) com a seleção do serviço.
2. Define-se os parâmetros da requisição de um serviço, que representam as opções obrigatórias ou opcionais para o detalhamento do serviço a ser consumido.
3. Os parâmetros de consulta alimentam uma interface para que a requisição possa ser virtualizada e integrada ao AAS. Nesta atividade a intenção de interação é virtualizada.
4. São definidos os protocolos de comunicação vertical para a comunicação com as camadas superiores.
5. O processo de requisição pode iniciar diretamente da camada Informação por meio de uma decisão autônoma sobre o serviço mais adequado, sem a necessidade de uma tomada de decisão manual por parte de uma pessoa/empresa.
6. A MDP local armazena os detalhes da requisição em um registro de requisições realizadas.
7. São definidos os protocolos de comunicação a serem utilizados na integração horizontal, assim como a especificação do padrão de requisição e resposta da API e o formato de intercâmbio de informações.
8. A requisição do serviço é enviada ao C4.0-Servidor via API.
9. O C4.0-Servidor recebe a requisição e a insere ao final da lista de requisições para ser processada.
10. A requisição é processada. Identifica-se nesta atividade se a requisição é válida e se ela contém todos os parâmetros necessários para o fornecimento do serviço.

Após o recebimento e processamento da requisição de um serviço, o C4.0-Servidor deve fazer a extração e envio das informações do ativo. A resposta contendo as informações sobre o produto começa com a emissão de um evento no ativo. Esta informação percorre um fluxo padrão para que seja disponibilizada ao C4.0-Cliente por meio do serviço. Este fluxo de atividades mostrado na [Figura 36](#) é detalhado a seguir:

1. Um evento físico no mundo real é emitido.
2. O evento fornece sinais físicos que podem ser medidos.
3. Os sinais físicos são interpretados e virtualizados. Nesta atividade é criado um correspondente virtual para o evento do ativo físico, ou seja, os dados são digitalizados e disponibilizados ao AAS.

Figura 36 – Diagrama PFS da resposta de um serviço em uma operação de interação.



Fonte: O autor.

4. É definido o meio de transporte e o protocolo de transferência de dados como, por exemplo, o Wi-Fi, Ethernet, 5G, etc.
5. Os dados são devidamente transportados pelo meio e protocolo definidos até uma central de processamento.
6. São definidos os protocolos de comunicação vertical para a comunicação com as camadas superiores.
7. Os novos dados sobre o ativo são armazenados pela MDP nos submodelos junto aos demais dados já existentes.
8. São definidas/acessadas as restrições legais e as políticas de privacidade para a autorização ou bloqueio do fornecimento do serviço.
9. É feita a autenticação do C4.0-Cliente solicitante do serviço. Nesta atividade é verificado se o cliente possui autorização para consumir o serviço e consequentemente os dados que estão sendo solicitados.
10. Após a autenticação, os dados são disponibilizados ao serviço.
11. O serviço é executado e sua resposta é gerada. O serviço pode executar quaisquer operações sobre os dados atualizados sobre o ativo assim como sobre o histórico de registros antigos já disponíveis nos submodelos.

12. São definidos os protocolos de comunicação a serem utilizados na integração horizontal, assim como a especificação do padrão de requisição e resposta da API e o formato de intercâmbio de informações.
13. A resposta do serviço (fornecimento do serviço) é enviada via API.
14. O C4.0-Cliente recebe a resposta do serviço no formato de intercâmbio definido.
15. Os dados recebidos na resposta são processados.
16. Opcionalmente a resposta e/ou resultados de processamento da resposta podem ser salvos na MDP local ou descartados.

5 O ciclo de vida do produto na I4.0

Este capítulo visa trazer discussões sobre o impacto do amplo compartilhamento da memória digital do produto ao longo da cadeia de suprimentos por meio serviços na Indústria 4.0.

São abordadas possíveis mudanças na curva de ciclo de vida do produto e o surgimento de novos modelos de negócio baseado em dados (*data-driven*).

Uma visão da MDP sobre o eixo “Ciclo de Vida e Cadeia de Valor” do RAMI4.0 é abordada, discutindo melhor o porquê e as atribuições dos AAs como “tipos” e como “instâncias”.

5.1 Ciclo de vida do produto no RAMI4.0

O modelo do RAMI4.0 apresenta um eixo de ciclo de vida generalizado, derivado da norma IEC 62890 ([ADOLPHS et al., 2015](#)). A ideia do trás do eixo Ciclo de Vida e Cadeia de Valor é representar, como o nome diz, o ciclo de vida de um Componente I4.0 ao longo de toda a sua cadeia de valor.

Os tipos estão presentes desde a concepção/conceitualização até os primeiros protótipos/testes. O tipo de um ativo é definido pelas suas propriedades e funcionalidades distintas. Todos os itens que são criados ao longo do projeto de um produto (e.g., desenhos em CAD, manuais, *softwares*, etc) são incorporados ao tipo do ativo. Informações associadas ao ativo que são criadas ao longo de seu desenvolvimento como informações de *marketing* também são incorporadas ao tipo.

As instâncias são criadas/produzidas com base nas informações de um tipo de ativo. Informações específicas sobre produção, logística, qualidade e testes são associadas à instância de um ativo. Na fase de instância do ativo, os dados de uso são coletados e associados para então poderem ser armazenados na MDP e compartilhados com outros parceiros ao longo da cadeia de suprimentos.

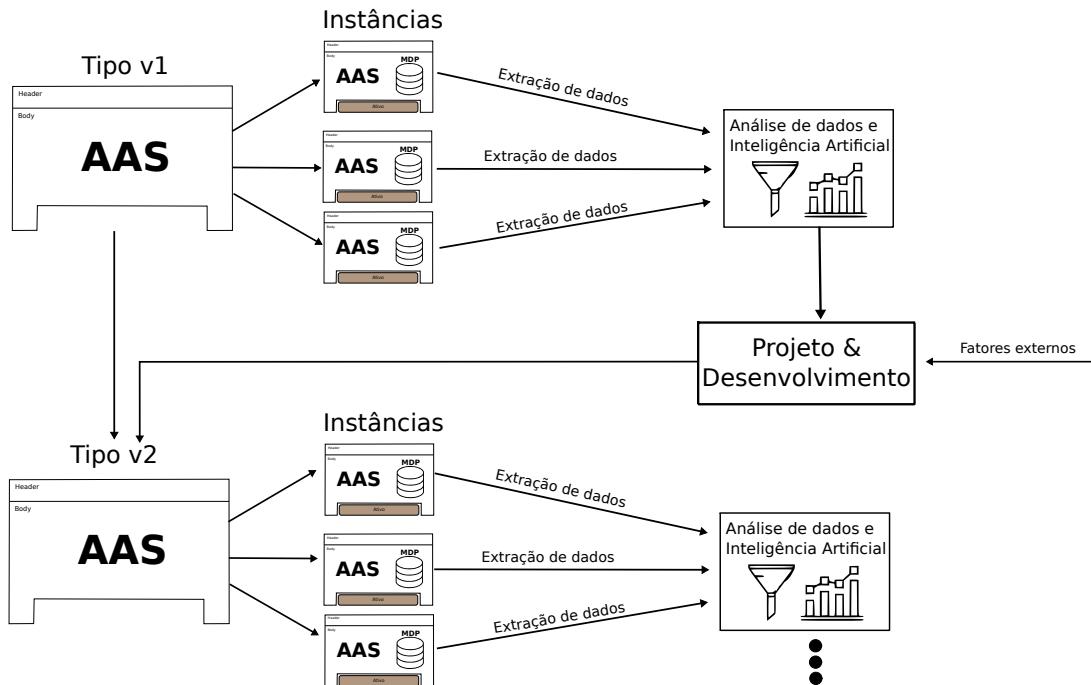
O histórico completo do ciclo de vida do produto está associados à combinação entre o tipo e a instância de um determinado produto. Estes dados podem ser aproveitados de forma inteligente para a geração de valor, gerando assim novos modelos de negócio.

Os relacionamentos entre tipos e instâncias são cíclicos e possibilitam a retroalimentação de informações. Para os ativos de um produto, por exemplo, informações sobre seu uso e manutenção armazenadas na MDP podem auxiliar em melhorias no seu próprio processo de fabricação, além de ser fonte de dados para o desenvolvimento de novas versões aperfeiçoadas do mesmo produto, gerando um novo tipo.

Portanto, o fluxo de informações entre tipos e instâncias de um produto são essenciais para a melhoria do projeto do produto. A [Figura 37](#) ilustra como ocorre a

instancialização (criação de uma instância a partir de um tipo) e o uso da MDP das instâncias para a criação de novas versões de um tipo.

Figura 37 – Ciclo de vida do produto.



Fonte: O autor.

5.2 Modelos de negócio orientados por dados

5.2.1 Desenvolvimento do produto orientado por dados

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

5.2.2 Manutenção do produto orientada por dados

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero,

nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

6 Publicações decorrentes do trabalho

Publicação 1 (VITOI; JUNQUEIRA; MIYAGI, 2019)

- Título do trabalho: “Análise de implementação de IoT na cadeia logística”
- Congresso: XXXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP 2019
- Status: Aprovado, apresentado e publicado nos anais do evento
- Autores: Henrique A. Vitoi, Fabrício Junqueira, Paulo E. Miyagi
- Apresentação: 16 de outubro de 2019, Santos/SP

Publicação 2 (CODA et al., 2019)

- Título do trabalho: “Big Data on Machine to Machine Integration’s Requirement Analysis Within Industry 4.0”
- Congresso: DoCEIS 2019: Technological Innovation for Industry and Service Systems
- Status: Aprovado e publicado
- Autores: Felipe A. Coda, Rafael M. Salles, Henrique A. Vitoi, Marcosiris A. O. Pessoa, Lucas A. Moscato, Diolino J. Santos Filho, Fabrício Junqueira, Paulo E. Miyagi
- Publicação: 16 de abril de 2019

7 Cronograma de atividades

O cronograma cumpridos nos anos de 2018 e 2019 é mostrado na [Tabela 8](#).

Tabela 8 – Cronograma detalhado de atividades em 2018 e 2019.

Etapas	2018		2019					
	set/ out	nov/ dez	jan/ fev	mar/ abr	mai/ jun	jul/ ago	set/ out	nov/ dez
Cumprimento dos créditos	C	C	C	C	C	C		
Levantamento bibliográfico	C	C	C	C	C	C	C	C
Desenvolvimento do projeto			C	C	C	C	C	C
Exame de Qualificação								
Defesa da dissertação								

Fonte: O autor.

O cronograma planejada no ano de 2020 é mostrado na [Tabela 9](#)

Tabela 9 – Cronograma detalhado planejado para 2020.

Etapas	2020					
	jan/ fev	mar/ abr	mai/ jun	jul/ ago	set/ out	nov/ dez
Cumprimento dos créditos						
Levantamento bibliográfico	C	C	C	C	A	A
Desenvolvimento do projeto	C	C	C	C	A	
Exame de Qualificação					A	
Defesa da dissertação						A

Fonte: O autor.

A data estipulada para defesa da dissertação pode ser postergada conforme a necessidade de refinamento do projeto, adicionando-se mais meses para levantamento bibliográfico e desenvolvimento do projeto, respeitando-se o prazo máximo para depósito da dissertação.

Disciplinas cursadas nos períodos 2018/3, 2019/1 e 2019/2:

- PMR5024 - Simulação de Sistemas;
- PTC5751 - Internet das coisas;
- PEA5003 - Sistemas Inteligentes de Transporte;
- PMR5023 - Modelagem e Análise de Sistemas;
- PTR5744 - Pesquisa Operacional;
- PRO5807 - Logística e Cadeia de Suprimentos;
- PMR5402 - Controle de Sistemas.

8 Conclusão

Referências

ACATECH. *Neue Chancen für unsere Produktion. 17 Thesen des Wissenschaftlichen Beirats der Plattform Industrie 4.0.* Berlin: Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech), 2014. Disponível em: <https://www.its-owl.de/fileadmin/PDF/Industrie_4.0/Thesen_des_wissenschaftlichen_Beirats_Industrie_4.0.pdf>. Citado na página 21.

ADOLPH, L. et al. *German Standardization Roadmap: Industrie 4.0 - Version 3.* Berlin, DIN e.V., 2018. Disponível em: <www.din.de/go/roadmapindustrie40-en>. Citado 4 vezes nas páginas 29, 31, 34 e 59.

ADOLPHS, P. et al. Structure of the administration shell. continuation of the development of the reference model for the industrie 4.0 component. *ZVEI and VDI, status report*, 2016. Citado na página 58.

ADOLPHS, P. et al. *Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0).* [S.l.]: ZVEI and VDI, Status report, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 20, 34, 64, 65 e 77.

ALYAHYA, S.; WANG, Q.; BENNETT, N. Application and integration of an rfid-enabled warehousing management system—a feasibility study. *Journal of Industrial Information Integration*, Elsevier, v. 4, p. 15–25, 2016. Citado na página 41.

ANNUNZIATA, M. *Manufacturing-As-A-Service Platforms: The New Efficiency Revolution.* Forbes, 2019. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/marcoannunziata/2019/05/13/manufacturing-as-a-service-platforms-the-new-efficiency-revolution>>. Citado na página 48.

BADER, S. et al. *Details of the Asset Administration Shell. Part1 - The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0 (Version 2.0).* [S.l.]: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi), Berlin, 2019. Citado 5 vezes nas páginas 35, 36, 57, 58 e 59.

BALLOU, R. H. *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial.* [S.l.]: Bookman Editora, 2006. Citado na página 38.

BARRETO, L.; AMARAL, A.; PEREIRA, T. Industry 4.0 implications in logistics: an overview. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 13, p. 1245–1252, 2017. Citado na página 41.

BEDENBENDER, H. et al. Examples of the asset administration shell for industrie 4.0 components - basic part. *ZVEI White Paper*, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 37, 38 e 59.

BELL, M. Service-oriented modeling. *John Wiley & Sons, Inc*, Wiley Online Library, 2008. Citado na página 45.

BIBI, F. et al. A review: Rfid technology having sensing aptitudes for food industry and their contribution to tracking and monitoring of food products. *Trends in Food Science & Technology*, Elsevier, v. 62, p. 91–103, 2017. Citado na página 41.

BOOTH, D. et al. Web services architecture-w3c working group note 11 february 2004. *World Wide Web Consortium, article available from: <http://www.w3.org/TR/ws-arch>*, p. 13, 2004. Citado na página 48.

BORDELEAU, F.-E.; MOSCONI, E.; SANTA-EULALIA, L. A. Business intelligence in industry 4.0: State of the art and research opportunities. In: *51st Hawaii International Conference on System Sciences*. [S.l.: s.n.], 2018. Citado na página 29.

BRANDHERM, B.; KRONER, A. Digital product memories and product life cycle. In: IEEE. *2011 Seventh International Conference on Intelligent Environments*. [S.l.], 2011. p. 374–377. Citado 3 vezes nas páginas 17, 44 e 45.

CÂNDIDO, G. et al. Generic management services for dpws-enabled devices. In: IEEE. *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. [S.l.], 2009. p. 3931–3936. Citado na página 45.

CAO, H.; FOLAN, P. Product life cycle: the evolution of a paradigm and literature review from 1950–2009. *Production Planning & Control*, Taylor & Francis, v. 23, n. 8, p. 641–662, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.

CODA, F. A. et al. Big data on machine to machine integration's requirement analysis within industry 4.0. In: SPRINGER. *Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems*. [S.l.], 2019. p. 247–254. Citado na página 81.

CSCMP. *Supply Chain Management Definitions and Glossary*. 2013. Disponível em: <https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx>. Citado na página 38.

DORST, W. et al. *Implementation Strategy Industrie 4.0*. [S.l.]: Bitkom e.V., VDMA e.V., ZVEI e.V., 2016. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

DRATH, R.; ALEXANDER, H. Industrie 4.0: hit or hype? *Industrial Electronics Magazine*, v. 8, n. 2, p. 56–58, 2014. Citado na página 31.

FAN, T. et al. Impact of rfid technology on supply chain decisions with inventory inaccuracies. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 159, p. 117–125, 2015. Citado na página 41.

FERRIS, C. Web services architecture. *Standard, W3C World*, W3C Working Group, p. 10, 2004. Citado na página 49.

FIELDING, R. T.; TAYLOR, R. N. *Architectural styles and the design of network-based software architectures*. University of California, Irvine Irvine, 2000. v. 7. Disponível em: <<https://restfulapi.net/http-methods/>>. Citado na página 49.

GAYKO, J. *The Reference Architectural Model RAMI4.0 and the Standardization Council as an element of success for Industry 4.0*. Standardization Council Industrie 4.0, 2018. Disponível em: <<https://www.din.de/blob/271306/340011c12b8592df728bee3815ef6ec2/06-smart-manufacturing-jens-gayko-data.pdf>>. Citado 4 vezes nas páginas 32, 33, 34 e 36.

- GERMANY. *Plattform Industrie 4.0 - Digital Transformation “Made in Germany”*. Berlin: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi), 2019. Disponível em: <<https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/plattform-flyer-en.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 31.
- GOSEWEHR, F. et al. Specification and design of an industrial manufacturing middleware. In: IEEE. *2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. [S.l.], 2017. p. 1160–1166. Citado na página 46.
- GOTTSCHALK, K. et al. Introduction to web services architecture. *IBM systems Journal*, IBM, v. 41, n. 2, p. 170–177, 2002. Citado na página 46.
- GROBA, C. et al. A service-oriented approach for increasing flexibility in manufacturing. In: IEEE. *2008 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*. [S.l.], 2008. p. 415–422. Citado na página 45.
- GRÜNER, S.; PFROMMER, J.; PALM, F. Restful industrial communication with opc ua. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 12, n. 5, p. 1832–1841, 2016. Citado na página 65.
- HAFTOR, D.; KAJTAZI, M. *What is Information Logistics?: An explorative study of the Research Frontiers of Information Logistics*. [S.l.]: Linnaeus University, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 38.
- HANKEL, M.; REXROTH, B. The reference architectural model industrie 4.0 (rami 4.0). *ZVEI, April*, v. 410, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 34.
- HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. In: IEEE. *49th Hawaii International Conference on System Sciences*. [S.l.], 2016. p. 3928–3937. Citado 6 vezes nas páginas 11, 18, 19, 27, 28 e 31.
- HIRSCH-KREINSEN, H. et al. Key themes of industrie 4.0. *Plattform Industrie 4.0 - Research Council*, 2019. Disponível em: <<https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/acatech-keythemes-industrie-4-0.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- HUGOS, M. H. *Essentials of supply chain management*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2018. Citado na página 39.
- IEC. *Smart manufacturing – Reference architecture model industry 4.0 (RAMI4.0)*. [S.l.]: IEC PAS 63088 - International Electrotechnical Commission, 2017. Citado na página 63.
- JENSEN, K. *Coloured Petri nets - Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use*. [S.l.: s.n.], 1997. v. 3. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- KAGERMANN, H.; LUKAS, W.-D.; WAHLSTER, W. Industrie 4.0: Mit dem internet der dinge auf dem weg zur 4. industriellen revolution. *VDI nachrichten*, v. 13, n. 1, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 27.
- KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0: Final report of the industrie 4.0 working group. *Forschungsunion: Berlin, Germany*, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 31.

- KREGER, H. et al. Web services conceptual architecture (wsca 1.0). *IBM software group*, v. 5, n. 1, p. 6–7, 2001. Citado na página 47.
- LASI, H. et al. Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, Springer, v. 6, n. 4, p. 239–242, 2014. ISSN 1867-0202. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>>. Citado 6 vezes nas páginas 17, 18, 20, 27, 30 e 31.
- LEE, H. L.; PADMANABHAN, V.; WHANG, S. Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect. *Management science*, Informs, v. 43, n. 4, p. 546–558, 1997. Citado na página 39.
- LEVITT, T. Exploit the product life cycle. *Harvard business review*, v. 43, p. 81–94, 1965. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.
- LIU, M. J. *Managing the Marketing Risk*. 2010. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/umiss/mmm2>>. Citado na página 43.
- MARCON, P. et al. The asset administration shell of operator in the platform of industry 4.0. In: IEEE. *2018 18th International Conference on Mechatronics-Mechatronika (ME)*. [S.l.], 2018. p. 1–5. Citado na página 37.
- MIYAGI, P. E. *Controle programável: fundamentos do controle de sistemas a eventos discretos*. [S.l.]: Editora Blucher, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 51.
- MORRIS, J. S. *Relational Database Technology*. 2017. Disponível em: <https://www.rbvi.ucsf.edu/Outreach/bmi219/slides/relational_databases.html>. Citado na página 65.
- MÜLBERT, A. L.; AYRES, N. M. *Fundamentos para Sistemas de Informação*. [S.l.]: Universidade do Sul de Santa Catarina, 2005. Citado na página 49.
- NICHOLS, M. R. *The Rise of Manufacturing as a Service*. BOSS Magazine, 2019. Disponível em: <<https://thebossmagazine.com/manufacturing-as-a-service/>>. Citado na página 48.
- OLIVEIRA, J. B.; LIMA, R. S.; MONTEVECHI, J. A. B. Perspectives and relationships in supply chain simulation: A systematic literature review. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Elsevier, v. 62, p. 166–191, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 50.
- PAELKE, V. Augmented reality in the smart factory: Supporting workers in an industry 4.0. environment. In: *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–4. ISSN 1946-0759. Citado na página 20.
- PISCHING, M. A. *Arquitetura para descoberta de equipamentos em processos de manufatura com foco na indústria 4.0*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 34.
- PISCHING, M. A. et al. An architecture based on ramí 4.0 to discover equipment to process operations required by products. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 125, p. 574–591, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.029>>. Citado na página 50.

PISCHING, M. A. et al. Pfs/pn technique to model industry 4.0 systems based on rami 4.0. In: IEEE. *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. [S.l.], 2018. v. 1, p. 1153–1156. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.

Plattform Industrie 4.0. *Details of the Administration Shell - From idea to implementation*. Plattform Industrie 4.0, 2019. Disponível em: <<https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/vws-in-detail-presentation.html>>. Citado na página 35.

PORTER, M. E. Competitive advantage: Creating and sustaining superior performance. *Competitive advantage*, v. 167, p. 167–206, 1985. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.

PORTER, M. E.; KRAMER, M. R. Criação de valor compartilhado. *Harvard Business Review*, v. 89, n. 1/2, p. 62–77, 2011. Citado na página 40.

RÜßMANN, M. et al. Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. *Boston Consulting Group*, v. 9, n. 1, p. 54–89, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

SCHAEFER, L. *What is NoSQL*. 2019. Disponível em: <<https://www.mongodb.com/nosql-explained>>. Citado na página 65.

SCHMITTNER, C. et al. Practical safe, secure and reliable machine-to-machine connectivity for cyber-physical-production systems. In: IEEE. *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. [S.l.], 2017. p. 1–4. Citado na página 29.

SCHWAB, K. *The fourth industrial revolution*. [S.l.]: Currency, 2016. Citado na página 28.

SIEPEN, S. *Manufacturing-as-a-Service*. LinkedIn arcticles, 2019. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/manufacturing-as-a-service-sven-siepen/>>. Citado na página 48.

SQUIT, S. *Orquestração de sistemas produtivos dispersos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.

STARK, J. Product lifecycle management. In: *Product lifecycle management (Volume 1)*. [S.l.]: Springer, 2015. p. 1–29. Citado na página 43.

STRANDHAGEN, J. O. et al. Logistics 4.0 and emerging sustainable business models. *Advances in Manufacturing*, Springer, v. 5, n. 4, p. 359–369, 2017. Citado na página 41.

TRAPPEY, C. V.; WU, H.-Y. An evaluation of the time-varying extended logistic, simple logistic, and gompertz models for forecasting short product lifecycles. *Advanced Engineering Informatics*, Elsevier, v. 22, n. 4, p. 421–430, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 42.

VAIDYA, S.; AMBAD, P.; BHOSLE, S. Industry 4.0 - a glimpse. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 20, p. 233–238, 2018. Citado na página 29.

VITOI, H. A.; JUNQUEIRA, F.; MIYAGI, P. E. Análise de implementação de iot na cadeia logística. In: ABEPRO. *39º Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. [S.l.], 2019. Citado na página 81.

VLACHOS, I. P. A hierarchical model of the impact of rfid practices on retail supply chain performance. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 41, n. 1, p. 5–15, 2014. Citado na página 41.

WAHLSTER, W. Digital product memory: Embedded systems keep a diary. *Harting tec. News*, v. 15, p. 7–9, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 17, 20, 43 e 44.

WAHLSTER, W. *Industrie 4.0: Active Semantic Product Memories for Smart Factories*. [S.l.]: IDA 30th Year Celebration Seminar Linköping, 2013. Citado na página 28.

WAHLSTER, W. *SemProm: Foundations of Semantic Product Memories for the Internet of Things*. [S.l.]: Springer, 2013. Citado na página 20.

WEYER, S. et al. Towards industry 4.0-standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. *Ifac-Papersonline*, Elsevier, v. 48, n. 3, p. 579–584, 2015. Citado na página 20.

Ye, X.; Hong, S. H. Toward industry 4.0 components: Insights into and implementation of asset administration shells. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, v. 13, n. 1, p. 13–25, March 2019. ISSN 1941-0115. Citado na página 35.

YOKOTANI, T.; SASAKI, Y. Comparison with http and mqtt on required network resources for iot. In: IEEE. *2016 international conference on control, electronics, renewable energy and communications (ICCEREC)*. [S.l.], 2016. p. 1–6. Citado na página 65.

ZÜHLKE. *Push digital innovation*. 2020. Disponível em: <<https://www.zuehlke.com/at/en/industries/machinery-electronics-and-metal-industries/>>. Citado na página 44.