

Henrique Abrantes Vitoi

**Integração da memória digital de produto ao RAMI4.0
para monitoramento de ativos ao longo da cadeia de valor**

São Paulo
2020

Henrique Abrantes Vitoi

Integração da memória digital de produto ao RAMI4.0 para monitoramento de ativos ao longo da cadeia de valor

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

Integração da memória digital de produto ao RAMI4.0 para monitoramento de ativos ao longo da cadeia de valor

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. Cadeia de Valor. Ciclo de vida do produto.

Abstract

This is the english abstract.

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

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de cadeia de suprimentos estendida.	18
Figura 2 – Cadeia de valor de Porter.	18
Figura 3 – Estágios do ciclo de vida do produto.	19
Figura 4 – Modelo de ciclo de vida do produto com renovação do produto.	20
Figura 5 – As revoluções industriais.	21
Figura 6 – Representação do RAMI4.0.	23
Figura 7 – Coleta de dados do produto ao longo da cadeia de valores.	24
Figura 8 – Temas-chave de pesquisa e desenvolvimento em I4.0.	26
Figura 9 – Metodologia de pesquisa utilizada.	29
Figura 10 – Evolução da indústria por meio das revoluções industriais.	32
Figura 11 – Transição do (a) modelo hierárquico tradicional para o (b) modelo flexível de comunicação entre dispositivos na Indústria 4.0.	33
Figura 12 – Avanços tecnológicos que moldam a I4.0.	34
Figura 13 – (a) Detalhamento de cada elemento do Eixo Camadas e (b) representação completa do RAMI4.0.	36
Figura 14 – (a) Detalhamento do eixo Ciclo de Vida e Cadeia de Valor e (b) representação completa do RAMI4.0.	37
Figura 15 – (a) Detalhamento do eixo Níveis Hierárquicos do RAMI4.0 e (b) representação completa do RAMI4.0.	38
Figura 16 – Representação do AAS como a parte virtual do Componente I4.0.	39
Figura 17 – Exemplificação de um AAS para um servomotor, incluindo os submodelos de dados técnicos, dados operacionais e documentação.	40
Figura 18 – Comunicação entre AASs de componentes I4.0.	41
Figura 19 – Detalhamento de funções no AAS por meio de submodelos.	42
Figura 20 – Interconexão entre os elementos do sistema com e sem um <i>middleware</i> .	43
Figura 21 – Componentes de um WS e operações.	45
Figura 22 – Diagrama UML com os atores e interações em um WS.	46
Figura 23 – Componentes e operações do WS.	48
Figura 24 – Diagrama PFS das operações do WS.	50
Figura 25 – Estrutura do AAS com seus submodelos e a MDP.	52
Figura 26 – Exemplificação das operações de publicação e busca.	54
Figura 27 – Camadas do RAMI4.0 com os componentes da arquitetura baseada em WSs.	57
Figura 28 – Diagrama PFS da operação de publicação.	58
Figura 29 – Diagrama PFS das duas partes da operação busca: (a) Requisição e (b) Resposta.	59

Figura 30 – Diagrama PFS da operação de interação.	60
Figura 31 – Ciclo de vida do produto.	62
Figura 32 – Formato de intercâmbio de informações da MDP em JSON.	66

Lista de tabelas

Tabela 1 – Princípios para implantação da I4.0 baseados em Hermann, Pentek e Otto (2016)	22
Tabela 2 – Eixos do RAMI4.0	36
Tabela 3 – Possíveis operações em um <i>RESTful Service</i>	46
Tabela 4 – Componentes do WS para I4.0.	48
Tabela 5 – Operações do WS para I4.0.	49
Tabela 6 – Cronograma detalhado de atividades	69

Listas de abreviaturas e siglas

AAS	<i>Asset Administration Shell</i> (Camada Administrativa do Ativo)
API	<i>Application Programming Interface</i> - Interface de Programação de Aplicação
CS	Cadeia de Suprimentos
CV	Cadeia de Valor
CVP	Ciclo de Vida do Produto
GCVP	Gestão do Ciclo de Vida do Produto
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
OSI	<i>Open System Interconnection</i> (Interconexão aberta de sistemas)
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)
SOA	<i>Service Oriented Architecture</i> (Arquitetura Orientada a Serviços)
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
UUID	<i>Universal Unique Identifier</i> (Identificador Único Universal)
WS	<i>Web Service</i> (Serviços Web)
WSDL	<i>Web Services Description Language</i> (Linguagem de Descrição de Serviços Web) WSDL()

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Indústria 4.0	21
1.2	Memória Digital do Produto	23
1.3	Interrelação entre I4.0 e MDP	25
1.4	Objetivos da pesquisa	26
2	METODOLOGIA	29
3	FUNDAMENTOS	31
3.1	Gestão do ciclo de vida do produto	31
3.2	Indústria 4.0	31
3.2.1	Modelo de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0	35
3.2.2	Asset Administration Shell	39
3.3	Memória digital do produto	41
3.4	Arquitetura orientada a serviços (SOA)	42
3.4.1	Serviços Web	43
3.4.2	Transferência Representacional de Estado	45
4	ARQUITETURA PARA COMPARTILHAMENTO DE INFORMAÇÕES DO ATIVO	47
4.1	Componentes e operações do WS	47
4.1.1	Componentes do WS	47
4.1.2	Operações do WS	49
4.2	Estrutura do AAS	50
4.2.1	Integração da MDP ao AAS	50
4.2.2	Detalhamento dos componentes do AAS	51
4.2.3	Metamodelo dos dados da MDP	52
4.2.4	Fluxo de fornecimento de serviços	53
4.3	Mapeamento das operações do WS no RAMI4.0	54
4.3.1	Descrição das camadas do RAMI4.0	55
4.3.2	Operação de Publicação	58
4.3.3	Operação de Busca	59
4.3.4	Operação de Interação	60
5	A MDP E O CICLO DE VIDA DO PRODUTO	61
5.1	Ciclo de vida do produto no RAMI4.0	61

5.2	Modelos de negócio orientados por dados	62
5.2.1	Desenvolvimento do produto orientado por dados	62
5.2.2	Manutenção do produto orientada por dados	63
6	PROVA DE CONCEITO	65
6.1	Arquitetura do WS e tecnologias utilizadas	65
6.2	Estruturação dos dados da MDP	65
6.3	API de interação Cliente-Servidor	65
7	PUBLICAÇÕES DECORRENTES DO TRABALHO	67
8	CRONOGRAMA DETALHADO	69
9	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS	73

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 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 mercadorias com outras regiões de forma efetiva, contribuindo decisivamente para melhorar o padrão econômico de vida geral.

A logística é o processo de planejamento, implantação e controle do fluxo eficiente e eficaz de mercadorias, serviços e das informações relativas desde o ponto de origem até o ponto de consumo 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 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 se 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 se otimizar ao máximo o processo de fornecimento de um produto, serviço ou informação.

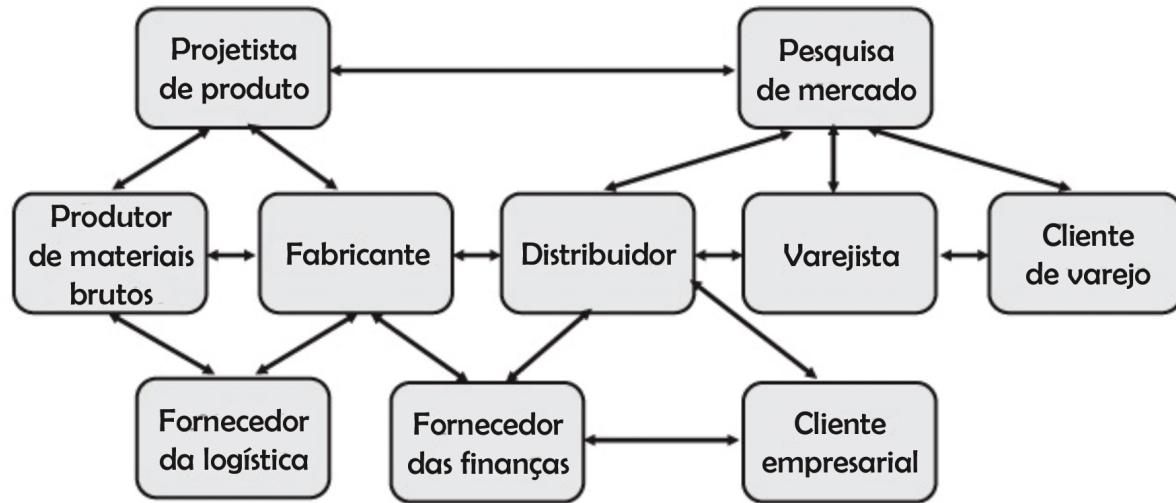
A ideia de uma CS simples envolve fornecedor, produtor e cliente (HUGOS, 2018), porém conceitos modernos ampliam a noção de CS para uma cadeia de suprimentos estendida, que inclui diversos outros fornecedores de serviços em áreas como logística, finanças, *marketing* e desenvolvimento; que, mediante coordenação e colaboração, criam oportunidades para melhoria dos custos ou serviços ao consumidor. A Capítulo 1 exemplifica a inter-relação das partes em uma cadeia de suprimentos estendida.

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.

Uma cadeia de valor (CV) é um conjunto de atividades que empresas de um setor

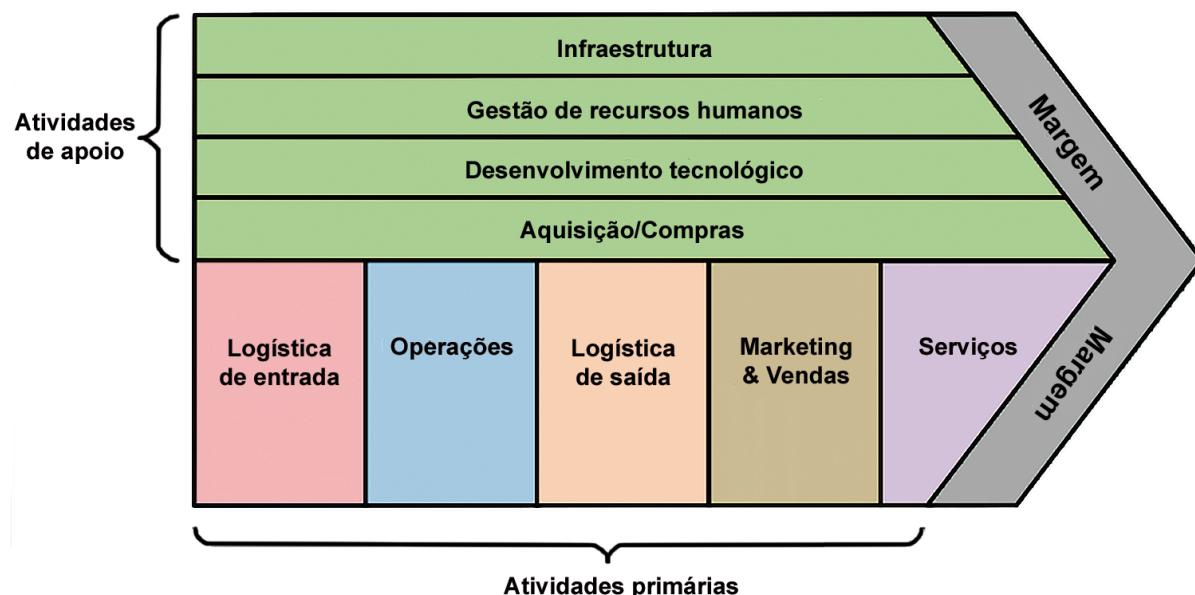
Figura 1 – Exemplo de cadeia de suprimentos estendida.



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

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 2](#)).

Figura 2 – Cadeia de valor de Porter.



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

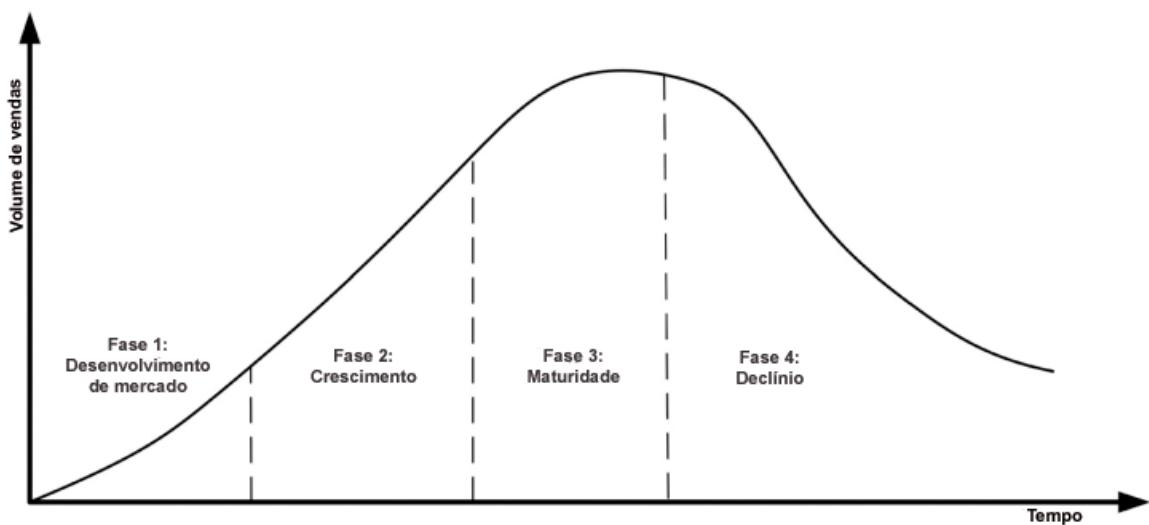
As CVs estão focadas em fornecer o máximo valor ao cliente (valor perceptível)

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.

Atrelado à cadeia de suprimentos e à cadeia de valor existe o conceito de ciclo de vida do produto, que foi um conceito 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 ao 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 3](#).

Figura 3 – Estágios do ciclo de vida do produto.



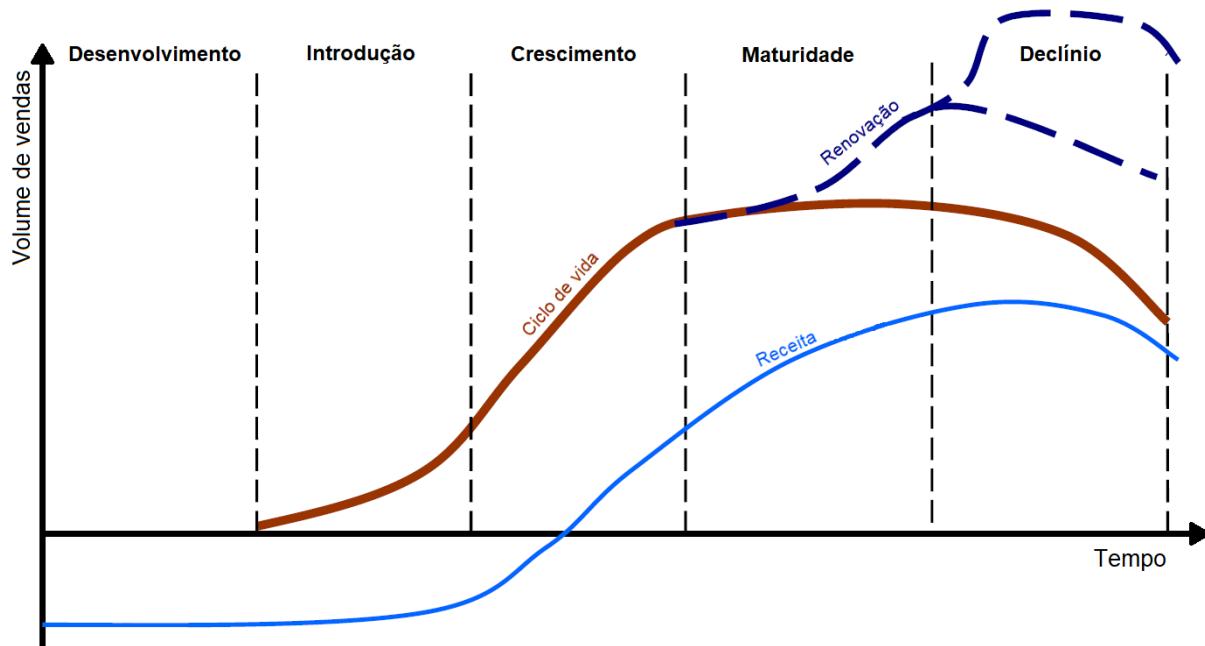
Fonte: [Levitt \(1965\)](#) (adaptado).

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 4 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.

Figura 4 – Modelo de ciclo de vida do produto com renovação do produto.



Fonte: Liu (2010) (adaptado).

Novas propostas de modificações de processos industriais aparecem como formas de se agregar mais valor ao produto/serviço considerando os ciclos de vida do produto cada vez mais curtos. Duas linhas de pesquisas criadas recentemente buscam trazer soluções para os problemas contemporâneos da indústria, como os listados anteriormente, que são os conceitos de Indústria 4.0 (I4.0) e Memória Digital do Produto (MDP).

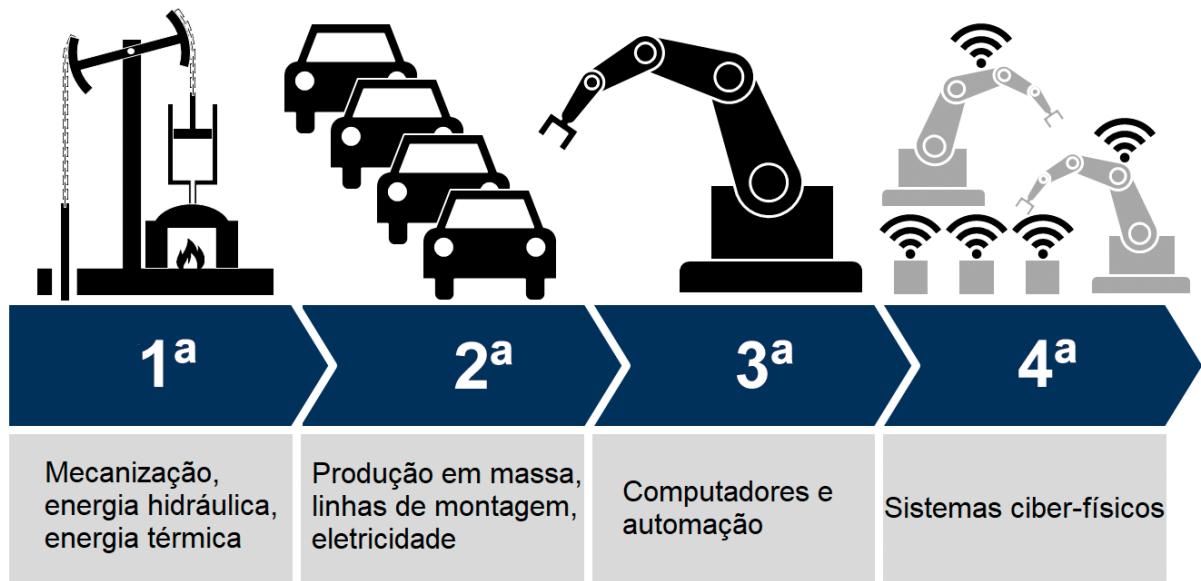
I4.0 e a MDP são conceitos altamente correlacionados, porém ainda não amplamente abordados em conjunto na literatura, criando assim uma oportunidade de pesquisa a partir de uma lacuna existente.

1.1 Indústria 4.0

A crescente integração das Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) às cadeias de valor industriais criou as bases para a próxima revolução industrial chamada Indústria 4.0 (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 5.

Figura 5 – As revoluções industriais.



Fonte: Lasi et al. (2014) (adaptado).

Tais modificações na indústria são essenciais devido às novas necessidades da própria indústria e de mudança de padrões de consumo do mercado. Isto acarreta mudanças 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.

Embora o termo I4.0 seja bastante comum na discussão tecnológica atual, muitas empresas, centros de pesquisa e universidades não mantém uma definição comum sobre o assunto. Segundo [Hermann, Pentek e Otto \(2016\)](#) e com base em uma revisão de literatura feita pelo mesmo autor, a I4.0 é identificada 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	Tomada de decisões baseadas nas informações coletadas pelo próprio dispositivo da 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 visualizável as informações de maneira comprehensível.

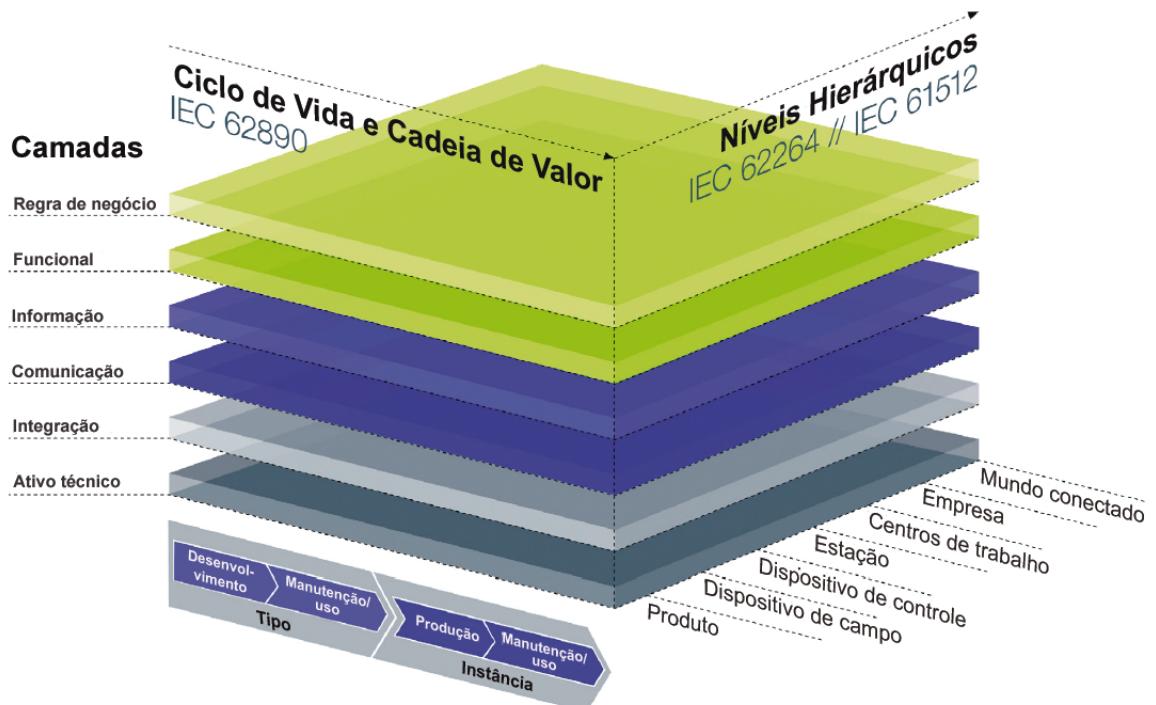
Fonte: O autor.

Os princípios elencados na [Tabela 1](#) 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 requer uma representação tridimensional, conforme a Figura 6. 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).

Figura 6 – Representação do RAMI4.0.



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

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.

1.2 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 valor, o que abrange dados de produção individual, de montagem, de distribuição, de uso por parte do consumidor, etc. A [Figura 7](#) ilustra o conceito de MDP.

Figura 7 – 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.

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

1.3 Interrelação entre I4.0 e MDP

Ambos os conceitos de I4.0 e MDP são conceitos recentes, surgidos em 2011 ([KAGERMANN; LUKAS; WAHLSTER, 2011](#)) e 2007 ([WAHLSTER, 2007](#)), respectivamente. A área multidisciplinar de estudo envolvendo MDP e I4.0 surgira 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 divulgada 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.

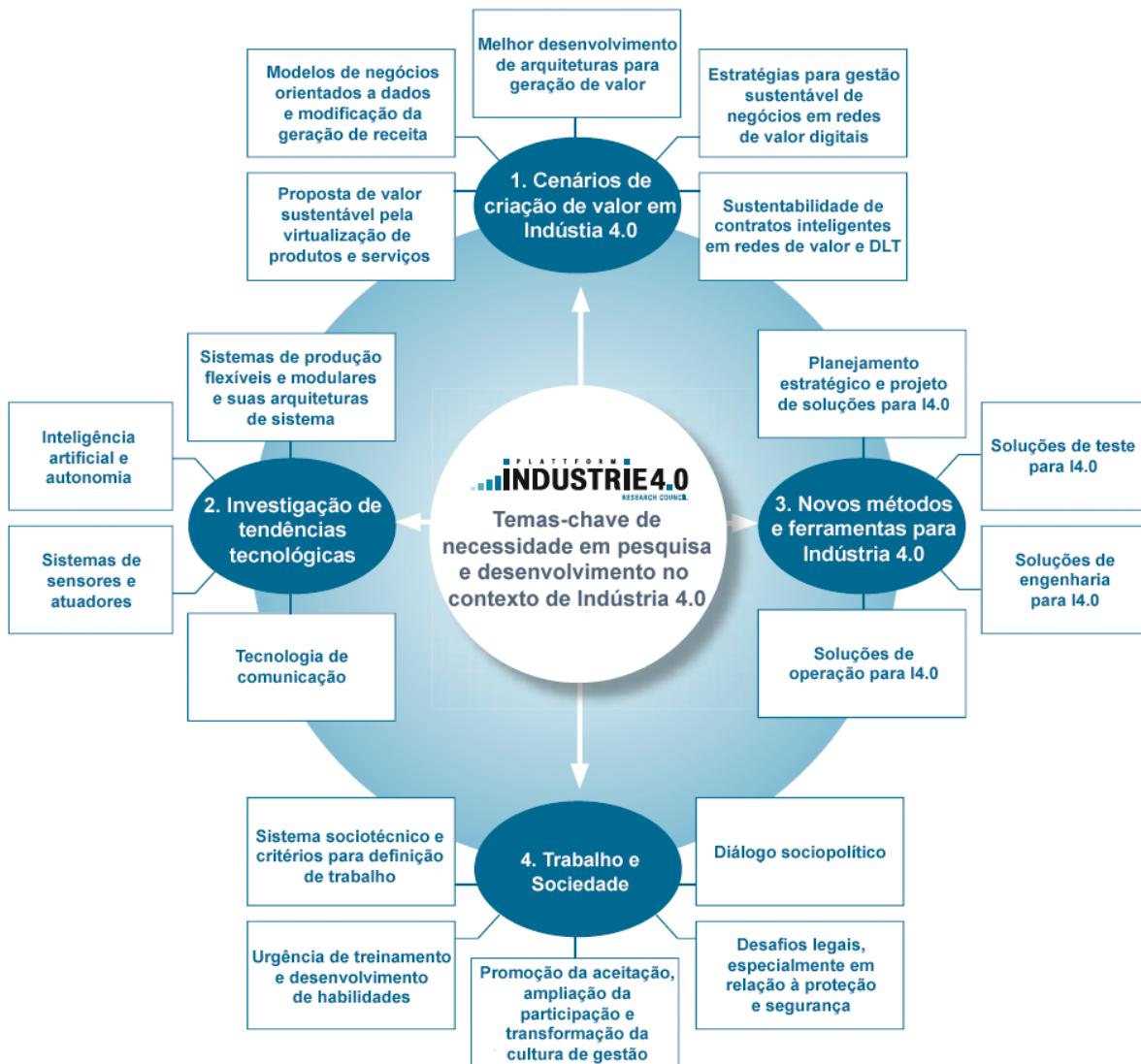
Há estudos na área multidisciplinar de I4.0 e MDP, principalmente no meio acadêmico, empresarial e governamental alemão pelo fato de esses conceitos terem surgido na Alemanha. Porém nenhum trabalho até o presente momento relaciona o modelo de arquitetura de referência para a I4.0 (RAMI4.0) com a MDP, 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, especificamente ao eixo de “Ciclo de Vida e Cadeia de Valor”, 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 ([HIRSCHKREINSEN et al., 2019](#)), conforme mostrado na [Figura 8](#). Isso significa que os tópicos elencados são temas com alto potencial para a otimização de rotinas e processos de produção existentes no cenário de I4.0.

Dentre os temas elencados na [Figura 8](#), destacam-se os subitens relacionados ao tópico “Cenários de criação de valor em Indústria 4.0” por estarem altamente relacionados

Figura 8 – Temas-chave de pesquisa e desenvolvimento em I4.0.



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

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.

1.4 Objetivos da pesquisa

O objetivo do trabalho de pesquisa é a investigação da integração do conceito de MDP ao RAMI4.0, especificamente ao eixo de “Ciclo de Vida e Cadeia de Valor”, 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.

Todo o estudo é feito com a proposta de aperfeiçoar o RAMI4.0 no sentido de

propiciar o surgimento de novos cenários de criação de valor no contexto de I4.0 e incentivar geração de novos modelos de negócio baseado em dados.

Este plano de pesquisa envolve o estudo de diversos temas relacionados à Indústria 4.0. Os principais itens estão explicitados a seguir. Diversos novos itens são adicionados ao foco de pesquisa à medida que há aprofundamento nos itens abaixo.

- Indústria 4.0;
- RAMI4.0;
- Cadeia de valor;
- Ciclo de vida do produto;
- Memória digital do produto;
- Internet das coisas.

Tais temas são estudados a fim de se analisar o estado da arte atual em I4.0 e a partir disso propor alterações sobre o RAMI4.0 incluindo o conceito de MDP.

2 Metodologia

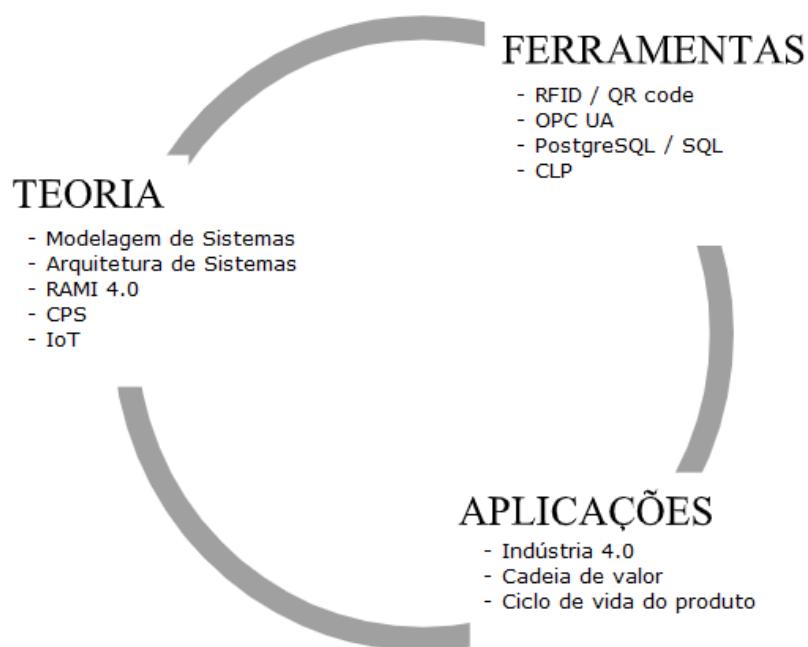
O trabalho é executado a partir de revisão bibliográfica de textos acadêmicos, como dissertações e teses, artigos publicados em revistas acadêmicas, livros teóricos e notas de estudos técnicos. A revisão bibliográfica tem o objetivo de se inteirar do estado da arte das tecnologias envolvidas na Indústria 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 naquela proposta por Jensen (1997), onde as etapas de pesquisa são compostas por um ciclo repetitivo de três aspectos, sendo elas as teorias, ferramentas e aplicações, conforme ilustrado na [Figura 9](#).

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 9 – Metodologia de pesquisa utilizada.



Fonte: Jensen (1997) (adaptado).

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

plano de pesquisa em questão, pode-se listar teorias, ferramentas e aplicações individuais do projeto, formando-se o ciclo mostrado na [Figura 9](#). Os três aspectos identificados na [Figura 9](#) devem evoluir simultaneamente, recondicionando-se mutuamente.

3 Fundamentos

3.1 Gestão do ciclo de vida do produto

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: desenvolvimento e introdução, crescimento, maturidade / estabilidade e declínio, conforme observado na [Figura 3](#).

Na GCVP, o gerenciamento dentro dos estágios mencionados pode se referir, por exemplo, a 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.

GCVP é o sistema de gerenciamento dos produtos de uma empresa. Sua função não é gerenciar apenas um de seus produtos, mas gerenciar de maneira integrada todas as suas 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 custos relacionados ao produto, maximizar o valor do portfólio de produtos e maximizar o valor dos produtos atuais e futuros para clientes e acionistas ([STARK, 2015](#)).

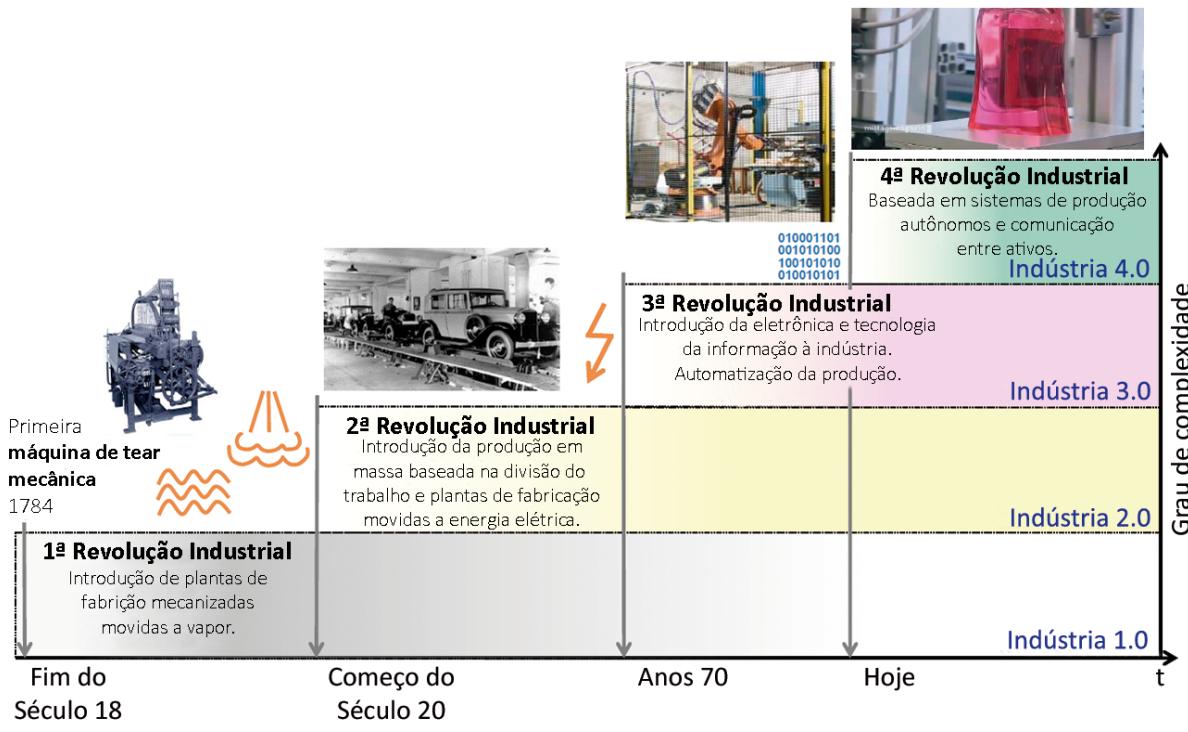
3.2 Indústria 4.0

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 10](#).

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

Figura 10 – Evolução da indústria por meio das revoluções industriais.



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

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](#)).

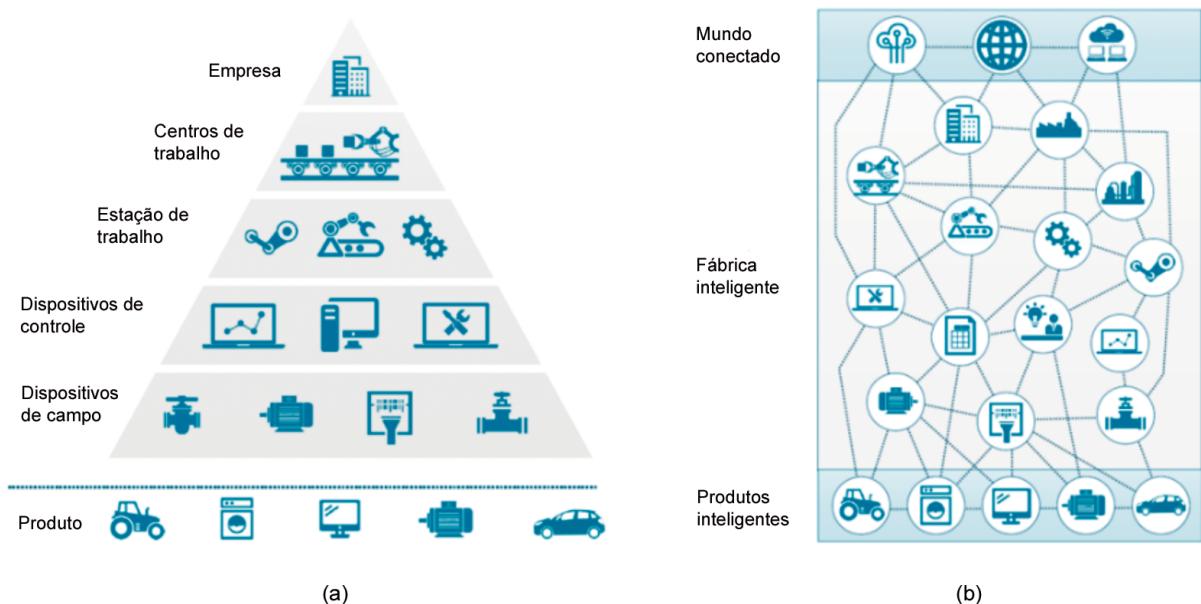
A quarta revolução industrial já está em curso segundo o Fórum Econômico Mundial ([SCHWAB, 2016](#)) em seu encontro anual realizado em Davos no ano de 2016 e as razões para o surgimento deste novo paradigma de produção incluem: a competição acirrada entre empresas, alta complexidade de manufatura dos produtos e seus altos níveis de personalização por parte dos clientes ([BORDELEAU; MOSCONI; SANTA-EULALIA, 2018](#); [VAIDYA; AMBAD; BHOSLE, 2018](#)).

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

Esses ativos são inseridos no meio digital, onde podem trocar informações entre si e executarem comandos de funções sob seu respectivo correspondente físico 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 comunicarem diretamente com outros elementos de diferentes níveis, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – 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).

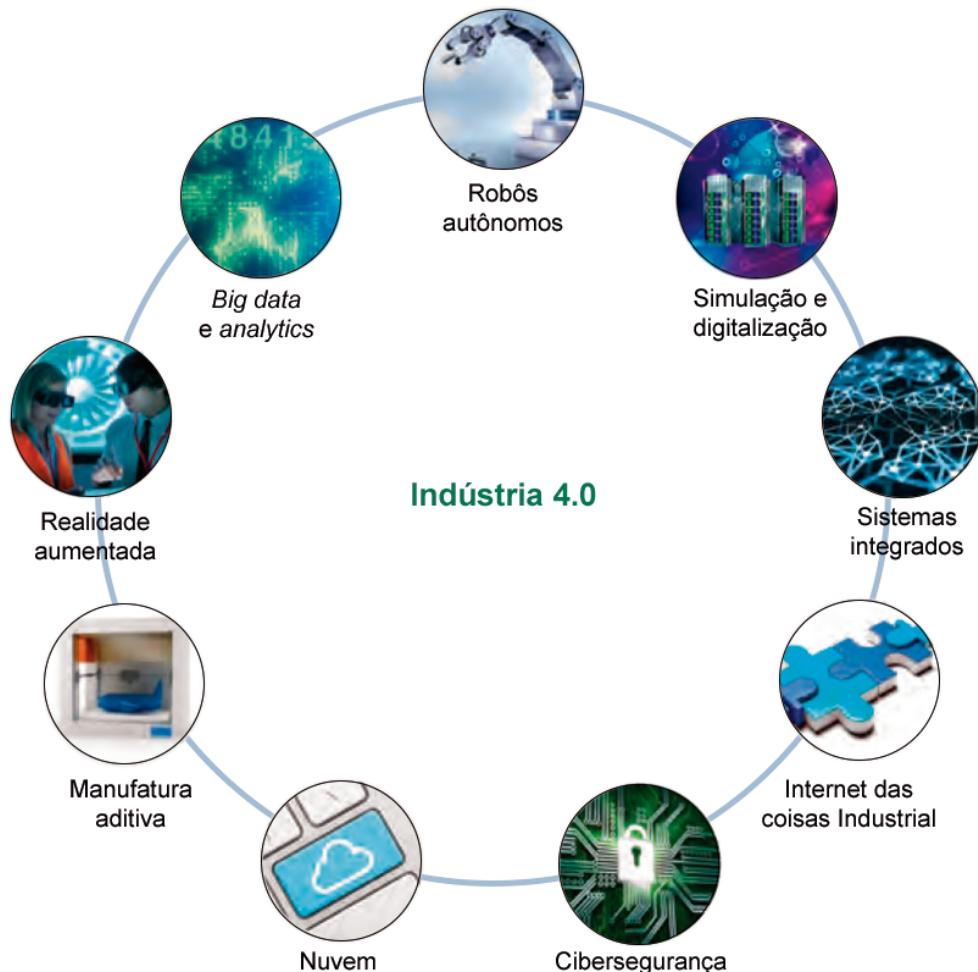
Essa automatização e a troca de informações entre os ativos tem grande potencial de dar mais eficiência aos processos industriais, pois desta forma o sistema pode tomar decisões ótimas com base nas informações que lhe foram fornecidas por meio de sensores e identificadores. A visão para o futuro da produção 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 devida à rápida introdução de novas tecnologias para satisfazer a demanda dos clientes, especialmente em produtos eletrônicos (TRAPPEY; WU, 2008). A I4.0 beneficia a chegada de produtos com curto ciclo de vida uma vez que o produto controla seu próprio processo de fabricação, facilitando, assim, ajustes e personalização 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 diversas. 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 12](#).

Figura 12 – 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 o “*Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0*” (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013), o “*German Standardization Roadmap - Industrie 4.0*” (ADOLPH et al., 2018) e o “*Implementation Strategy Industrie 4.0*” (DORST et al., 2016) publicados em inglês com normas e diretrizes para a implementação da I4.0. Esta iniciativa atrelada ao entusiasmo acadêmico em torno do projeto I4.0 disseminaram 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 por meio de sua consolidação como mercado líder e fornecedor de soluções para a Indústria 4.0.

3.2.1 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 6](#) mostra a representação do RAMI4.0 e especifica os itens contidos em cada eixo. A [Tabela 2](#) fornece uma breve descrição de cada eixo do RAMI4.0.

A [Figura 13](#) 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 al., 2016):

1. **Ativo:** Representa um elemento da realidade e não necessariamente físico, como, por exemplo, um máquina, um *software*, uma documentação, uma ideia, etc. O trabalhador e seu conhecimento sendo aplicado representa também um ativo. 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

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, este 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 assim o “Produto”, o “Dispositivo de campo” e a conexão com a IoT (Mundo conectado).

Fonte: O autor.

Figura 13 – (a) Detalhamento de cada elemento do Eixo Camadas e (b) representação completa do RAMI4.0.



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

realidade mudar, este evento então é relatado à camada de integração e os dados são atualizados no mundo virtual.

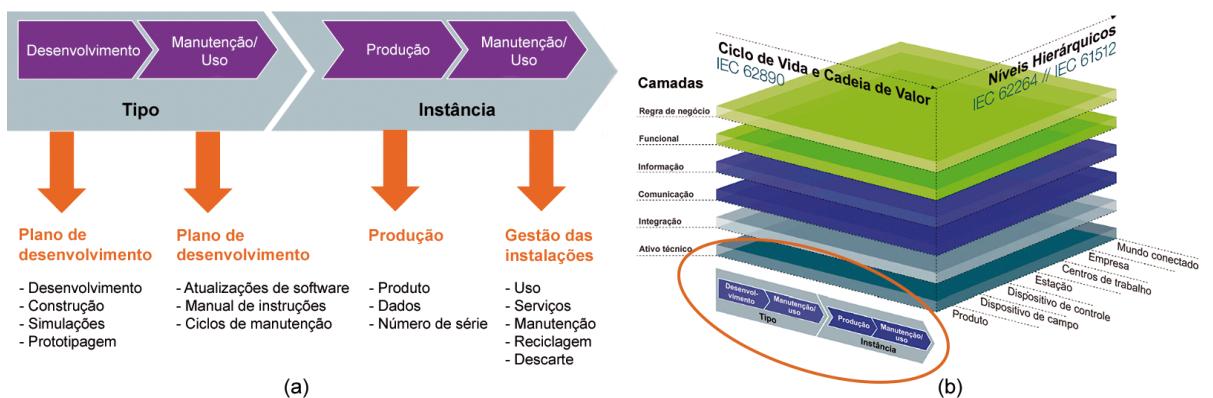
3. **Comunicação:** Padronização da comunicação por meio da adoção de um formato de troca de dados uniforme entre os dispositivos. Esta camada é a responsável pela interoperabilidade entre os ativos na I4.0. A camada de Comunicação fornece dados sobre o ativo à camada de informação.
4. **Informação:** Controle dos dados do ativo. Esta camada agrupa todos dados sobre um determinado ativo e é responsável pelo gerenciamento destes 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 plataforma para integração horizontal das funcionalidades. As regras de negócio e a lógica de tomada de decisão são geradas dentro desta camada. A camada funcional é a interface para fornecimento de informações por meio de microsserviços para outros ativos tanto dentro (integração vertical) como fora (integração horizontal) da empresa.
6. **Regra de negócio:** Contém as regras de negócio que o sistema deve seguir como, por exemplo, as condições legais e regulatórias. A camada Regra de negócio também é responsável por mapear os modelos de negócios do sistema e orquestrar os serviços da camada funcional.

Já os elementos do eixo “Ciclo de Vida e Cadeia de Valor” do RAMI4.0 são detalhados na [Figura 14](#), juntamente com seu destaque dentro do modelo completo.

Figura 14 – (a) Detalhamento do eixo Ciclo de Vida e Cadeia de Valor e (b) representação completa do RAMI4.0.



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

A I4.0 oferece um grande potencial de aprimoramento dos processos ao longo do ciclo de vida do produto. O eixo Ciclo de vida e Cadeia de valor fornece uma representação do estado do ativo ao longo de toda a cadeia de suprimentos correspondente a 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](#)).

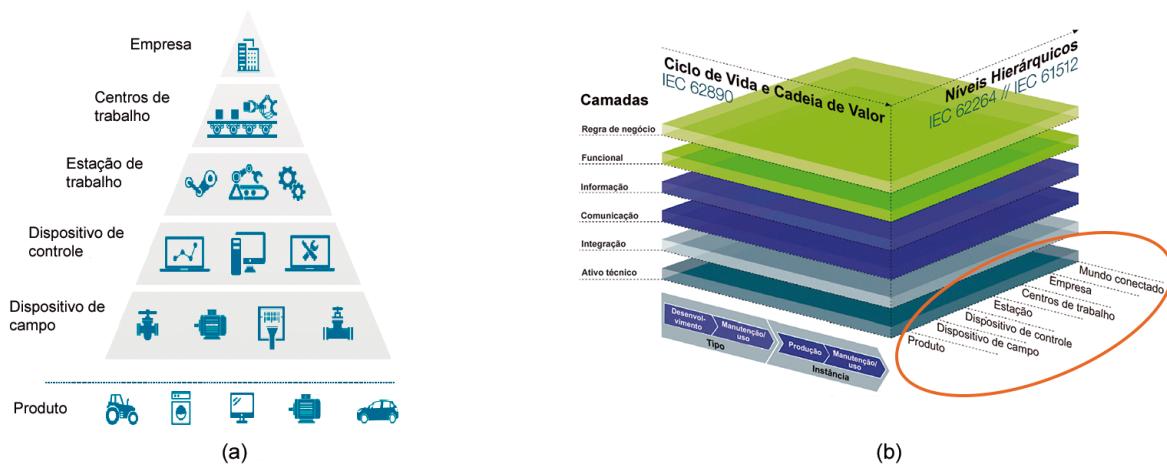
Com a conclusão de todas as etapas de testes e validação, o tipo é liberado para produção em série. A partir de então, novos produtos podem ser instanciados com base neste “tipo” validado.

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.

Finalmente o eixo “Níveis Hierárquicos” do RAMI4.0 é apresentado na Figura 15.

Figura 15 – (a) Detalhamento do eixo Níveis Hierárquicos do RAMI4.0 e (b) representação completa do RAMI4.0.



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

O eixo Níveis Hierárquicos do RAMI 4.0 descreve a integração dos sistemas empresariais de controle ([PISCHING, 2018](#)). Este eixo representa as diferentes funcionalidades das fábricas.

É uma reformulação da norma ISA-95 para o contexto da I4.0 e define a classificação funcional de cada ativo da Indústria 4.0, direcionando as etapas da produção para as demais funções. Os níveis hierárquicos do RAMI 4.0 são divididos em ([ADOLPHS et al., 2015](#)):

- Produto;
- Dispositivo de campo;
- Dispositivo de controle;
- Estação de trabalho;
- Centros de trabalho;

- Empresa;
- Mundo conectado.

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.

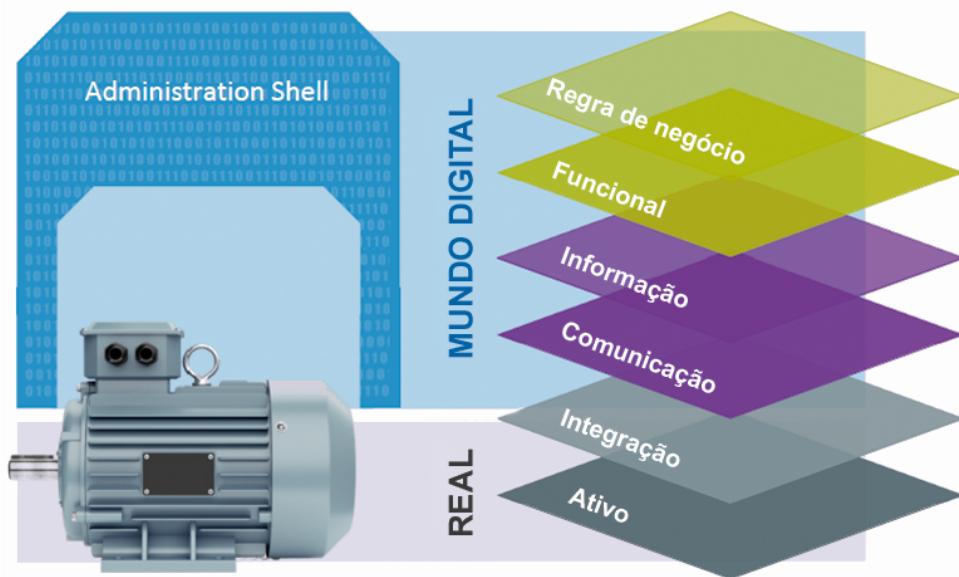
3.2.2 Asset Administration Shell

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, também chamada de *Administration Shell*. O *Administration Shell* do ativo técnico é denominado “*Asset Administration Shell*” (AAS). Este 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: Comunicação, Informação, Funcional e Regra de Negócio; 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 16.

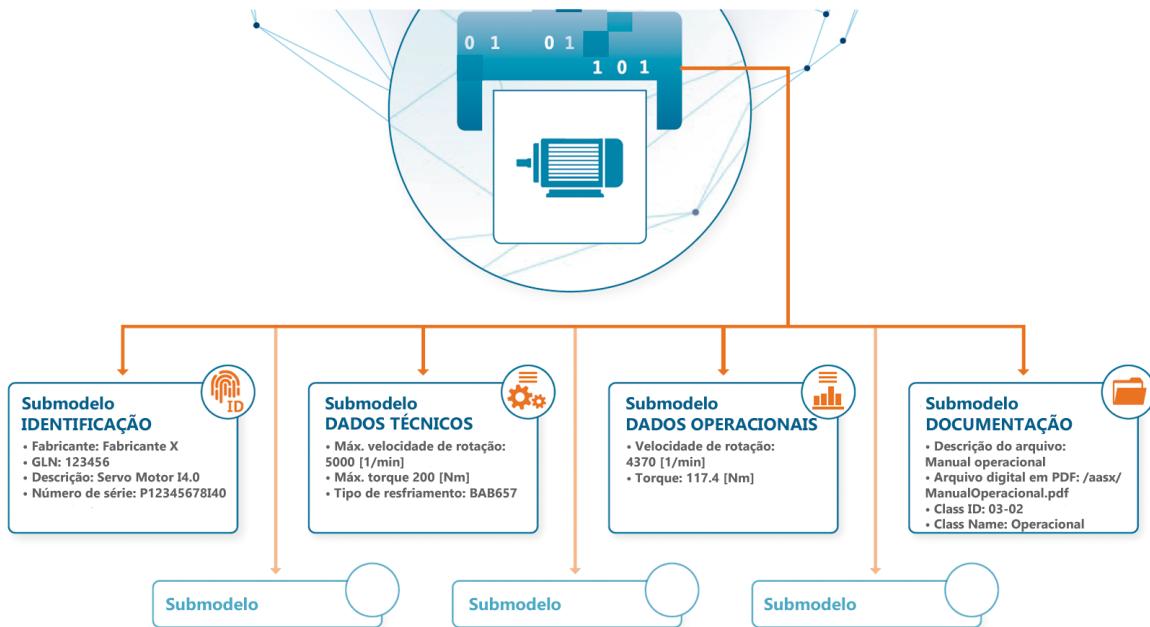
Figura 16 – Representação do AAS como a parte virtual do Componente I4.0.



Fonte: Gayko (2018) (adaptado).

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 17 exemplifica um AAS como sendo uma “casca” que engloba o ativo em si, essa casca contém informações relevantes do ativo em forma de “submodelos”.

Figura 17 – Exemplificação de um AAS para um servomotor, incluindo os submodelos de dados técnicos, dados operacionais e documentação.



Fonte: Bader et al. (2019) (adaptado).

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).

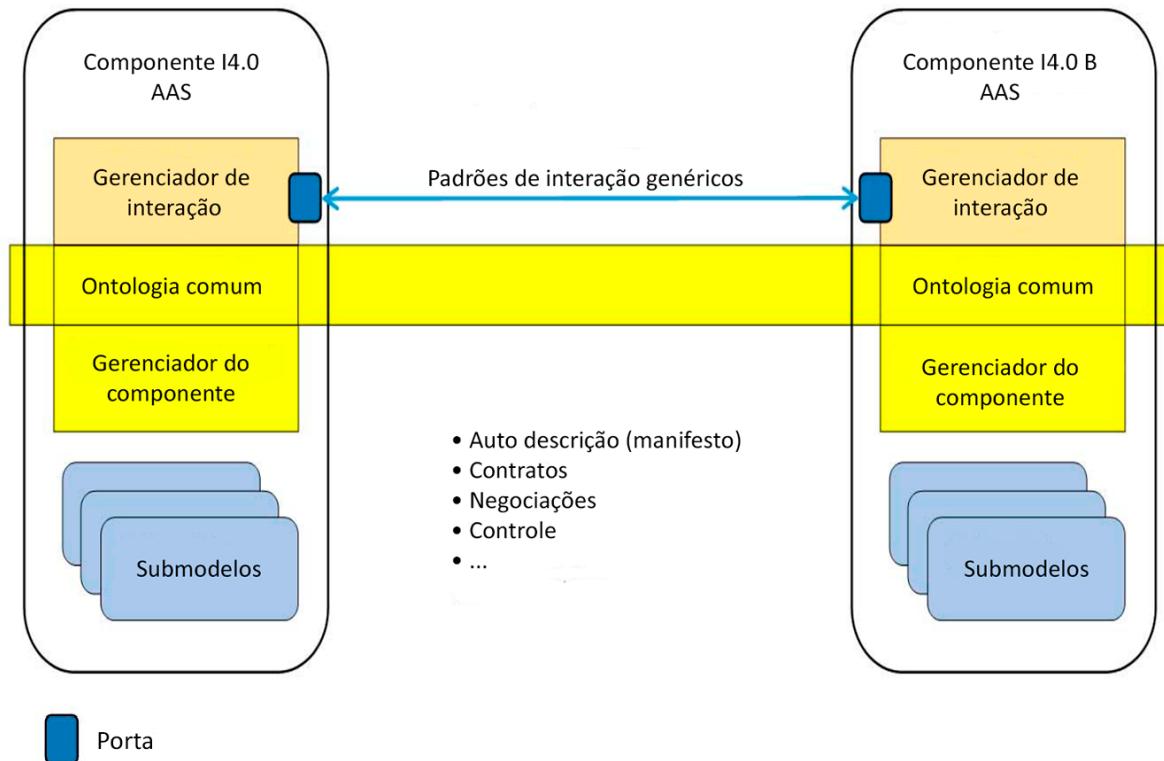
Os submodelos básicos são unidades de organização que se aplicam a muitos ou todos os ativos dentro do mundo I4.0. Já os submodelos livre são acertados entre os parceiros na cadeia de suprimentos e possuem um uso específico para um determinado produto.

O AAS é um elo entre os ativos reais e seus correspondentes digitais no mundo conectado. A Figura 18 ilustra a comunicação entre diferentes AASs em um ambiente de manufatura I4.0 sob uma ontologia comum.

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

Figura 18 – Comunicação entre AASs de componentes I4.0.



Fonte: Marcon et al. (2018) (adaptado).

para definir requisitos para a fabricação de produtos ([BEDENBENDER et al., 2017](#)). A [Figura 19](#) mostra um exemplo de detalhamento de funções sobre um ativo.

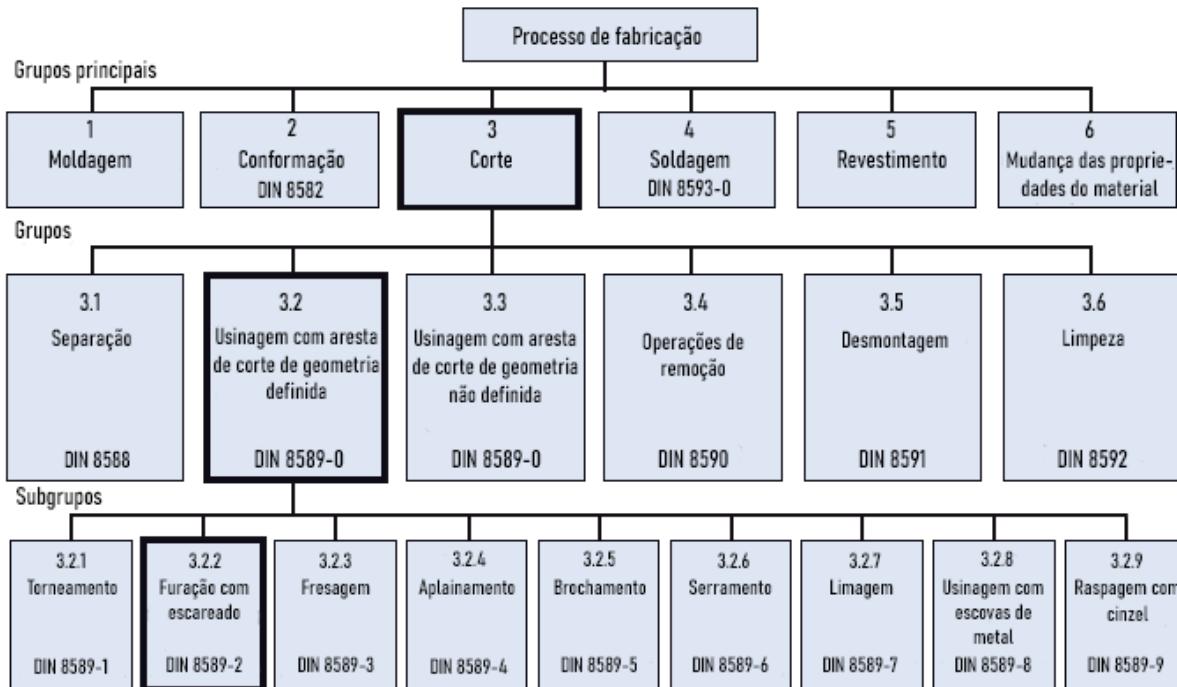
No ambiente de manufatura baseado na I4.0, o produto descreve os requerimentos necessários para sua fabricação e então esses requerimentos são comparados com as descrições das funções das máquinas disponíveis. Portanto, a seleção de um ativo é otimizada, baseando-se nos requerimentos do produto e nas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

3.3 Memória digital do produto

Os produtos que são produzidos no cenário de Indústria 4.0 são equipados com a memória digital do produto (MDP). Por meio dessa memória podem ser acessadas e redistribuídas informações sobre o produto ao longo de toda a cadeia de valores.

A MDP é alimentada e disponibilizada ao longo de todo o ciclo de vida do produto, podendo ser acessada por qualquer elo na cadeia de suprimentos (fabricante, distribuidor, varejista, consumidor). Mesmo no pós-venda, a MDP ainda se faz presente. O consumidor ainda pode ter acesso às informações dos produtos em cada ponto da cadeia de suprimentos e se beneficiar de serviços individuais que se acumulam na memória ([BRANDHERM; KRONER, 2011](#)).

Figura 19 – Detalhamento de funções no AAS por meio de submodelos.



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

Nesse contexto, a MDP mantém 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 de produtos ao longo da cadeia de valores uma vez que pode armazenar informações geoespaciais do ativo ao longo do tempo.

3.4 Arquitetura orientada a serviços (SOA)

Arquitetura Orientada a Serviços (SOA) é um estilo de projeto de software em que serviços são disponibilizados a outros sistemas por meio de protocolo de comunicação comum em uma rede (BELL, 2008). Um serviço SOA 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 SOA, a abordagem é como uma caixa preta, o que significa que o consumidor não sabe ou não precisa estar ciente do funcionamento interno do serviço, sendo apenas o resultado do serviço relevante. Os serviços SOA representam uma lógica de fornecimento de resultados que possibilitam a abstração de problemas.

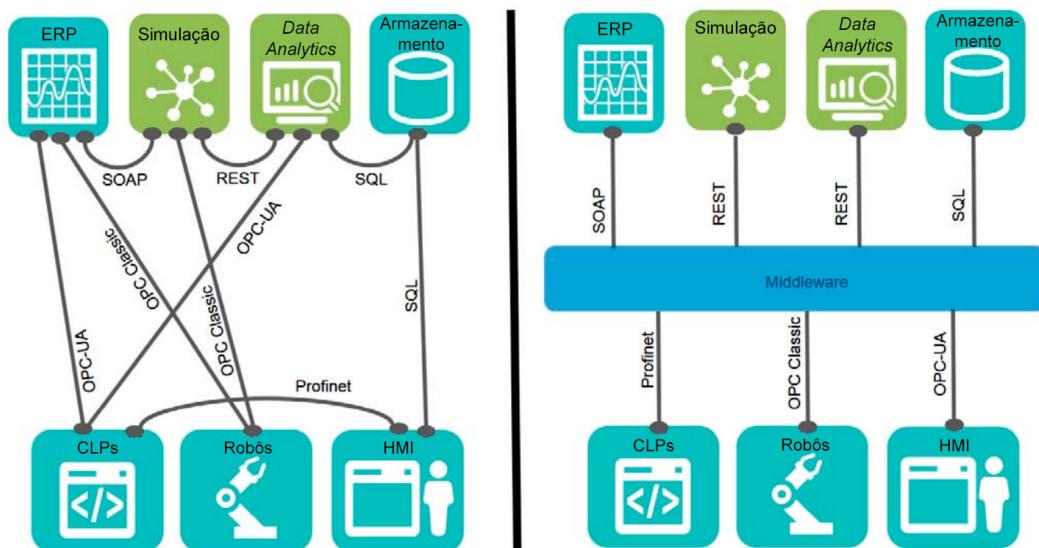
Dentro do mundo da Indústria 4.0 e de sistemas produtivo, a SOA é uma abordagem

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 SOA 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 20 ilustra como se dá a interconexão entre os elementos do sistema com e sem um *middleware*.

Figura 20 – Interconexão entre os elementos do sistema com e sem um *middleware*.



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

SOA está relacionado 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 SOA, os Web Services (WSs) são a tecnologia mais adotada para implementar uma API (SOUT, 2013). Os WSs podem ser vistos como uma tecnologia padrão para facilitar a interoperabilidade, integração e reuso de componentes da aplicação, isto é, serviços.

3.4.1 Serviços Web

Um serviço da Web 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 serviço da Web 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) (SQUIT, 2013).

A arquitetura do Web Service é constituída por três atores básicos: o provedor, o repositório e o solicitante; e por três operações básicas: a publicação, a procura e a interação (GOTTSCHALK et al., 2002). A Figura 21 ilustra os atores e a interação entre eles por meio das operações.

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:** 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.
- **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.

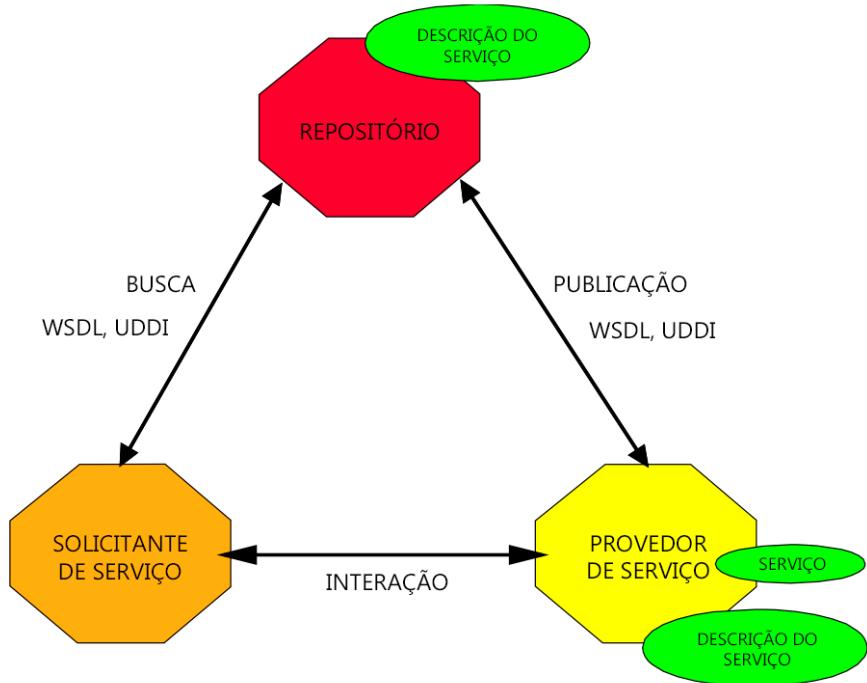
Já as operações básicas em WS em detalhe são:

- **Publicação:** Publicação pelo provedor da descrição do serviço em um repositório para que o serviço se torne acessível a público e 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 dentro 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 22.

Os WSs se tornaram bastante atrativos, pois este 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

Figura 21 – Componentes de um WS e operações.



Fonte: [Kreger et al. \(2001\)](#) (adaptado).

Web se tornou muito popular e com isso aparecem 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 uma manufatura como um serviço (*Manufacturing as a Service*) ([ANNUNZIATA, 2019](#); [NICHOLS, 2019](#); [SIEPEN, 2019](#)).

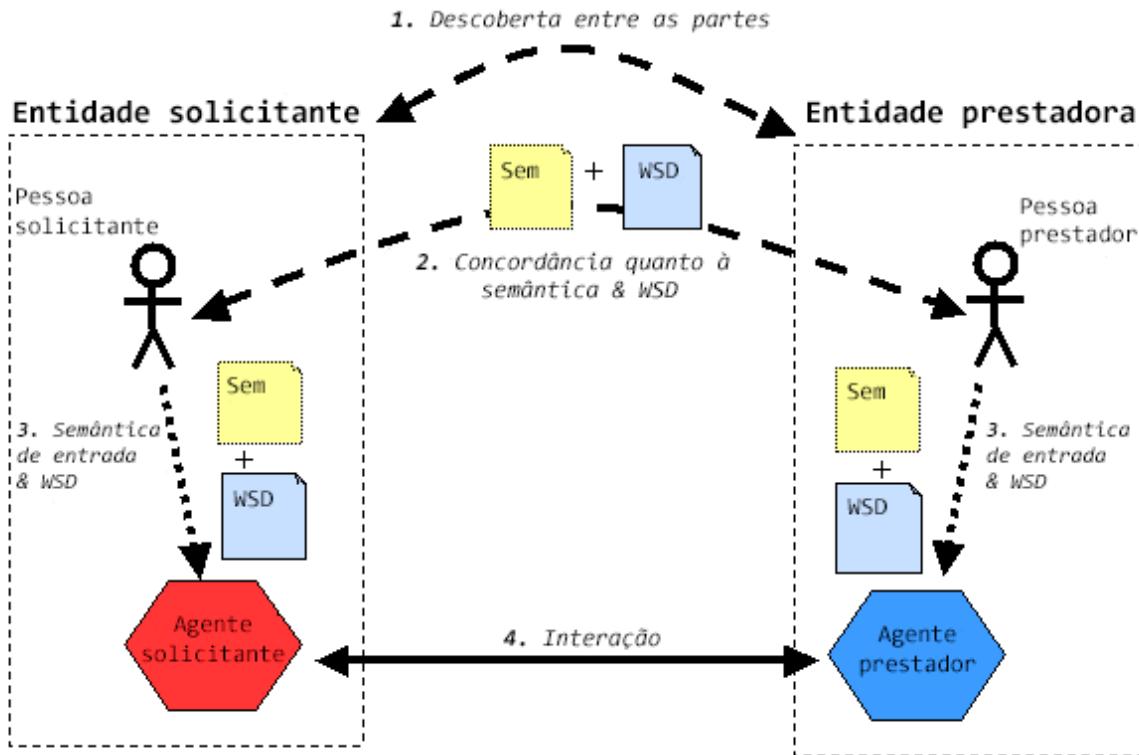
3.4.2 Transferência Representacional de Estado

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 permitem 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 serviço REST, cada método do protocolo recebe um tipo de operação padrão do REST. A [Tabela 3](#)

Figura 22 – Diagrama UML com os atores e interações em um WS.



Fonte: Booth et al. (2004) (adaptado).

mostra as possíveis operações em um RESTful Service e seu método HTTP correspondente, 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).

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 CS adotando este sistema.

Esta seção 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.

É apresentado também nesta seção o mapeamento dos componentes desta arquitetura dentro do eixo camadas do RAMI4.0.

4.1 Componentes e operações do WS

Um WS é um serviço disponibilizado remotamente por meio de um servidor, que escuta e responde solicitações de clientes por meio de uma determinada rede e porta. Os clientes, por sua vez, consomem o serviço disponibilizado pelo servidor por meio de solicitações.

Os componentes e operações da arquitetura proposta para a comunicação entre ativos ao longo da Cadeia de Suprimentos é baseada na estrutura de um WS (vide [Figura 21](#)). Esta arquitetura envolve três componentes (atores) básicos: O cliente, o servidor e o repositório; e três operações: publicação, busca e interação.

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

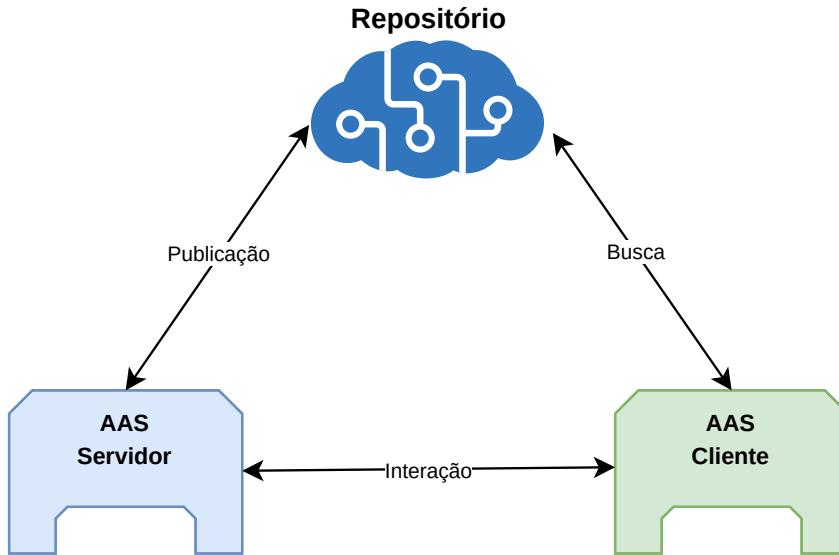
4.1.1 Componentes do WS

Os três componentes/atores em um WS são: O Cliente, o Servidor e o repositório. Estes componentes e suas interrelações são apresentadas na [Figura 23](#).

De maneira sucinta, os componentes são descritos da seguinte forma: “O AAS Servidor” é a parte que tem um serviço a oferecer para os demais AASs no mundo conectado, o “AAS Cliente” é a parte que necessita de algum serviço e que age ativamente para receber este serviço e o “Repositório” é a parte que armazena informações sobre descrições de vários serviços.

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

Figura 23 – Componentes e operações do WS.



Fonte: O autor.

Tabela 4 – Componentes do WS para I4.0.

Componente	Descrição
AAS Servidor	O AAS Servidor é a conexão direta com o ativo. Este AAS extrai e disponibiliza informações sobre o ativo para a MDP. 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.
Repositório	O repositório é a plataforma 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 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 que o disponibilizou, servindo o repositório apenas como uma plataforma de descobertas de serviços.

Cada AAS pode atuar tanto como um fornecedor de serviços (servidor), quanto

como um solicitante de serviços (cliente), sempre usando o repositório como plataforma para descoberta.

4.1.2 Operações do WS

Os três tipos básicos de operações em um WS são: a publicação, a busca e a interação. A interrelação das operações com os componentes são apresentadas na [Figura 23](#).

As operações do WS e suas descrições detalhadas são apresentadas na [Tabela 5](#)

Tabela 5 – Operações do WS para 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 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 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 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 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 devem ser definidos protocolos padrão a fim de se garantir a interoperabilidade entre os componentes. A WSDL (*Web Services Description Language*) é um documento que funciona como uma linguagem de descrição de *Web Services*, que, além de descrever o serviço, especifica como acessá-lo e quais as operações ou métodos disponíveis.

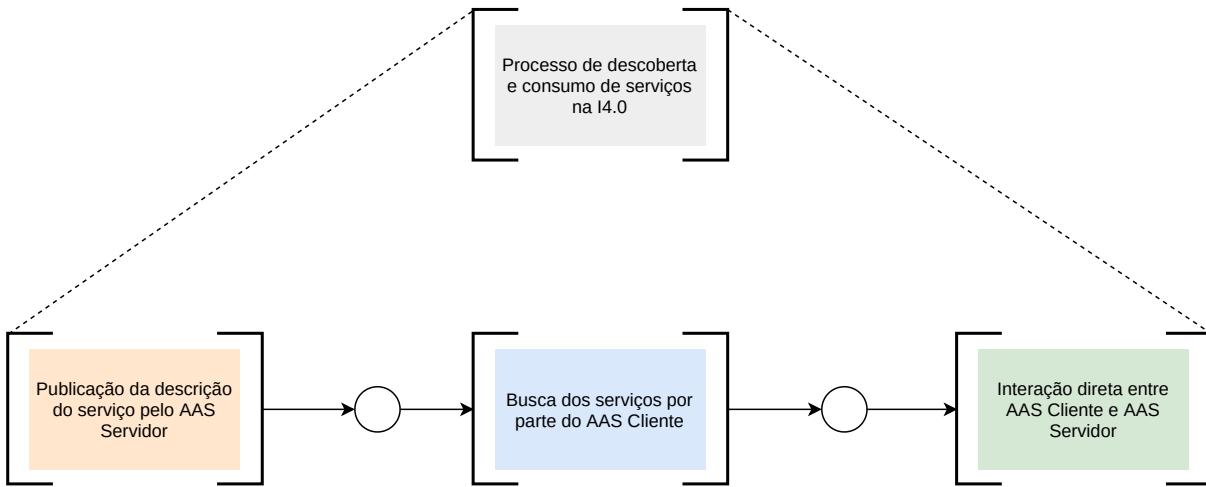
A WSDL se aplica para as operações de comunicação com o repositório: publicação e busca. A WSDL estabelecerá também os padrões de comunicação suportados pelo AAS Servidor, como, por exemplo, o padrão REST ou o padrão SOAP.

Quando o AAS atua como Servidor, este AAS publica a descrição de seus serviços no repositório por meio da WSDL. Quando como Cliente, o AAS busca no repositório um serviço desejado e recebe uma lista de opções de serviços com suas respectivas descrições também por meio da WSDL. Assim, o serviço mais adequado pode ser selecionado.

Uma vez definido o serviço a ser consumido, o AAS Cliente estabelece 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 24 apresenta um diagrama PFS (*Production Flow Schema*) com o fluxo ocorrência das operações básicas no WS para a I4.0.

Figura 24 – 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 valor. 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 a estruturação do AAS para que sejam compatíveis com a proposta de fornecimento de serviços 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 aos dados do ativo, ao gerenciamento desses dados e às funções básicas

aplicadas em cima desses dados. A MDP contém informações referentes a cada um dos submodelos em um AAS. Cada submodelo agrupa informações semelhantes relativas ao ativo.

A MDP, na prática, não estará necessariamente presente no escopo físico do ativo ao qual ela se relaciona. 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 requisições de serviços solicitados.

4.2.2 Detalhamento dos componentes do AAS

O AAS é composto pelo cabeçalho (*header*) e o corpo (*body*).

O cabeçalho tem a função de providenciar informações públicas sobre o ativo que o identifiquem minimamente e que forneça uma descrição sobre seus serviços oferecidos. Contém 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 contém 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 em um cabeçalho de AAS deve necessariamente conter também referências ao AAS Servidor, ou seja, *links* e identificações que permitam que o cliente possa localizar, contactar e invocar o serviço ofertado.

O cabeçalho não tem a função de fornecer uma ficha técnica detalhada, mas apenas uma caracterização abstrata do ativo. Dependendo da confidencialidade do ativo, o submodelo de identificação pode apenas apresentar o UUID como informação pública. Sem o UUID, o AAS se torna inacessível para qualquer uma das partes da cadeia de suprimentos.

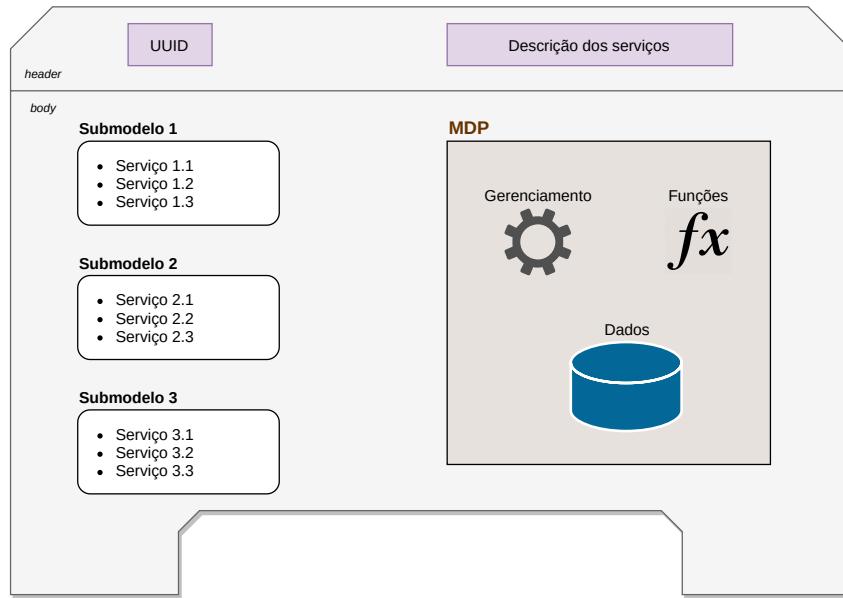
O corpo (*body*) de um AAS fornece as informações e funcionalidades sensíveis sobre o ativo, que podem ser acessadas mediante autenticação. As funcionalidades dos ativos são agrupadas em forma de submodelos, que são unidades de agrupamento de funcionalidades semelhantes, como propriedades, serviços e demais regras de negócio do ativo. Já os dados relativos aos submodelos são armazenadas e gerenciadas pela MDP, que também está localizada no corpo do AAS.

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 de WS proposta é apresentada na [Figura 25](#).

Os dados contidos na MDP sobre submodelos, quando processados, fornecem informações sobre o ativo e agregam valor ao mesmo. Além disso, novos modelos de

Figura 25 – Estrutura do AAS com seus submodelos e a MDP.



Fonte: O autor.

negócio surgem sob os dados gerados pelo ativo.

Neste trabalho, é dado enfoque aos submodelos que oferecem serviços de consulta de dados a qualquer uma das partes ao longo da cadeia de suprimentos. Alguns exemplos desse tipo de submodelo podem incluir: a ficha técnica detalhada do ativo, submodelos de histórico de leitura de sensores, histórico de geolocalização do ativo, histórico de padrão de uso, etc.

4.2.3 Metamodelo dos dados da MDP

As informações contidas na MDP devem ser estruturadas de forma tal que facilite a interpretação destes dados do lado do cliente. Para isso, metamodelos devem ser aplicados. Os metamodelos estabelecem os moldes sobre o qual devem ser elaborados os dados.

Segundo Radack (2009), a norma IEC 61360 fornece uma estrutura e um modelo de informações no formato de dicionários de produtos. O conceito de tipo de produto é representado por “classes” e as características do produto são representadas por “propriedades”.

Tais propriedades são elementos de dados padronizados. As definições de tais propriedades podem ser encontradas em vários repositórios, como IEC CDD (dicionário de dados comuns) ou eCl@ss.

A definição de uma propriedade associa um identificador exclusivo mundial a uma definição, que é um conjunto de atributos bem definidos. Atributos relevantes para o AAS são, entre outros, seu nome, o símbolo, a unidade de medida e uma definição textual legível para humanos da propriedade (BADER et al., 2019).

A publicação sugere formatos de transferência e armazenamento de dados. É especificado o UML (modelo neutro) e esquemas em XML e JSON, assim como mapeamentos para OPC UA, AutomationML e o *Resource Description Framework* (RDF) ([Plattform Industrie 4.0, 2019](#)).

4.2.4 Fluxo de fornecimento de serviços

As etapas para o fornecimento de serviços na I4.0 segue um fluxo padrão. A [Figura 26](#) demonstra uma exemplificação do fluxo de operações básicas de um WS em funcionamento. Neste exemplo, um AAS de um produto mantém contato com o AAS da empresa do fabricante, com o AAS da empresa do distribuidor e com o AAS do consumidor final, fornecendo o serviço de consulta de informações de diferentes submodelos para cada um dos solicitantes.

Neste exemplo, há três submodelos disponíveis no AAS Produto: Submodelo “geolocalização”, submodelo “sensores” e submodelo “documentação”. Os serviços de todos os submodelos disponíveis são mapeados pelas funções da MDP e, assim, é gerada uma lista de descrições de serviços. Esta lista de descrições de serviços é publicada no repositório.

O repositório 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 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.

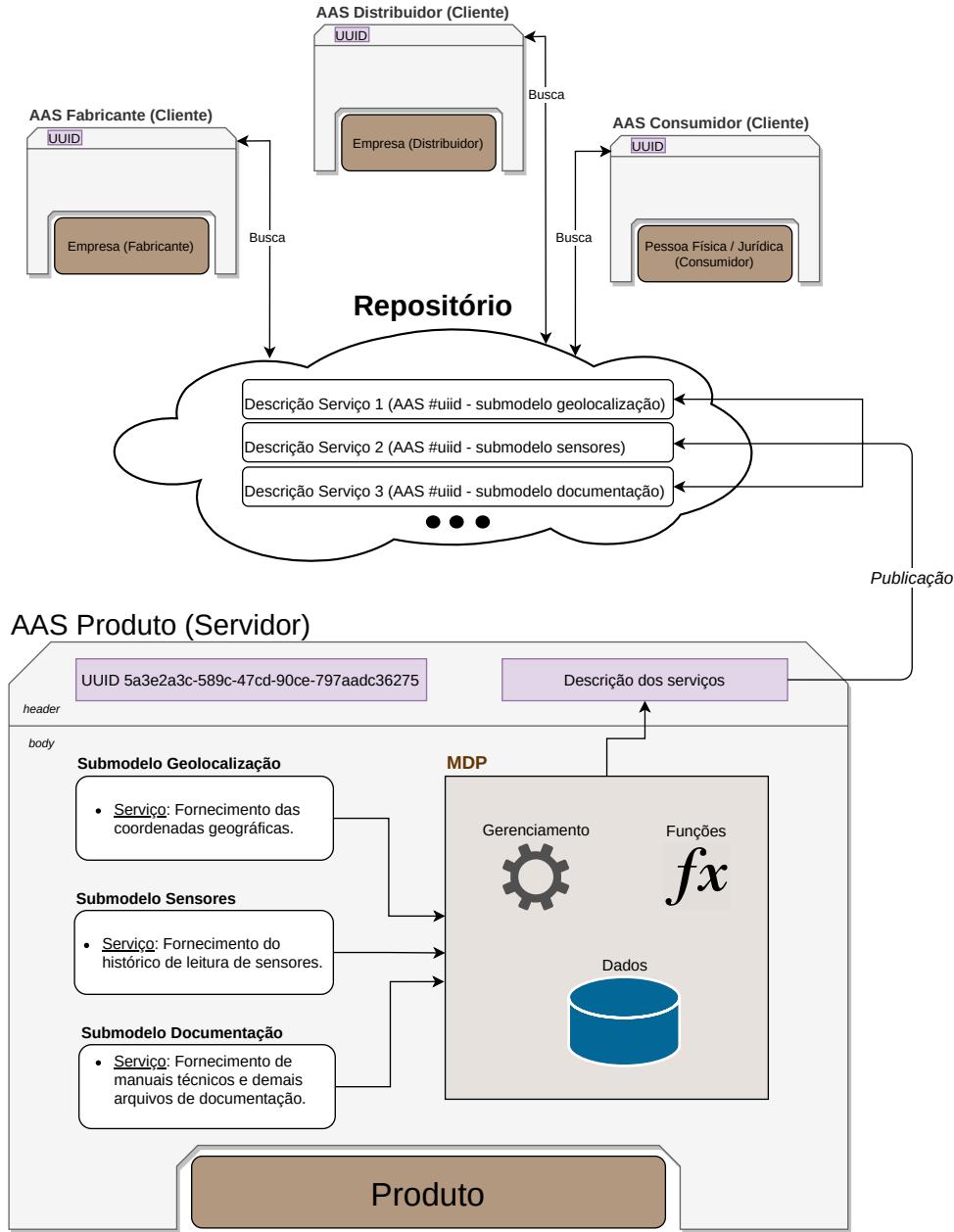
Cada AAS Cliente (Fabricante, Distribuidor e Consumidor), portanto, realiza a consulta ao repositório com os seus parâmetros de interesse e recebe a resposta com descrições detalhadas sobre os serviços disponíveis e informações para localizar, contactar e invocar estes serviços.

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 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 e identificar possíveis falhas precocemente.

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.

Figura 26 – Exemplificação das operações de publicação e busca.



Fonte: O autor.

4.3 Mapeamento das operações do WS 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, interrelações complexas podem ser divididas em seções menores e mais gerenciáveis, combinando os três eixos em cada ponto da vida do ativo para representar cada aspecto relevante.

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 também para facilitar a execução de implementações do modelo de WS junto a outras soluções de I4.0, garantindo a interoperabilidades entre os sistemas.

4.3.1 Descrição das camadas do RAMI4.0

A camada mais inferior, **Ativo**, é onde estão os elementos reais do Componente I4.0, como, por exemplo, máquinas, sensores, pessoas, etc; e qualquer outro elemento, físico ou não, que represente valor ao negócio.

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 a fins de controle da planta de produção.

No mundo I4.0, além de serem usados a fins de controle, podem ser usados estrategicamente para se agregar valor ao próprio ativo. Portanto, estes dados são extraídos do ativo e repassados às camadas superiores até que cheguem à Camada de Informação, onde são armazenados na MDP.

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

Na arquitetura proposta baseada em WSs, é possível elencar alguns componentes inclusos nessa camada, como os dispositivos físicos e os meios de sensoriamento desses dados. Outros elementos usuais dessa camada como os dispositivos de atuação e de controle também estariam inclusos, porém não se aplicam para a arquitetura de WSs.

Na camada de **Integração**, estão as funcionalidades responsáveis pela virtualização de todos os ativos da camada inferior ([ADOLPHS et al., 2015](#)), ou seja, a transformação de um evento real em sinais digitais. Representa a ponte entre o mundo real e o virtual.

Na arquitetura proposta baseada em WSs, esta camada é relevante para o AAS Servidor, pois é dele que serão extraídos os dados desde o ativo até as camadas superiores.

Esta camada contém também as tecnologias de transferência de dados, como o Wi-Fi, Ethernet, 5G, Bluetooth, etc.

A camada **Comunicação** estabelece os protocolos de comunicação entre o dispositivo real e seu AAS, como os protocolos OPC-UA, Profinet, Profibus, etc.

A camada Comunicação realiza também o pré-processamento dos dados, o que inclui a remoção de redundâncias, duplicidades e remoção de *outliers*.

A camada de **Informação** é onde os dados são de fato armazenados, para isso, modelos de estrutura de banco de dados são definidos de acordo com os tipos de dados e suas aplicações. Alguns exemplos de estrutura de dados incluem: banco de dados relacio-

nais (MySQL, Postgres, SQLite), banco de dados orientados a documentos (MongoDB, CouchDB), banco de dados do tipo chave-valor (Redis, Oracle NoSQL DB), etc.

Esta camada é responsável por gerar e armazenar a descrição dos serviços oferecidos pelo AAS. Além disso a camada Informação contém a parte da MDP providencia os dados sob autenticação, ou seja, realiza o controle de acesso a suas informações sensíveis.

Na camada **Funcional** é onde ocorre toda a interação com outros AASs 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 através da camada funcional, portanto é a interface entre os AASs.

A camada Funcional define 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). Alguns outros protocolos também são adotados como o MQTT, que está presente principalmente na área de automação residencial e IoT (YOKOTANI; SASAKI, 2016).

A última camada, **Regra de Negócio**, é onde estão contidas as questões legais do AAS, como as políticas de privacidade dos dados, as condições regulatórias e demais restrições aplicadas sobre os serviços.

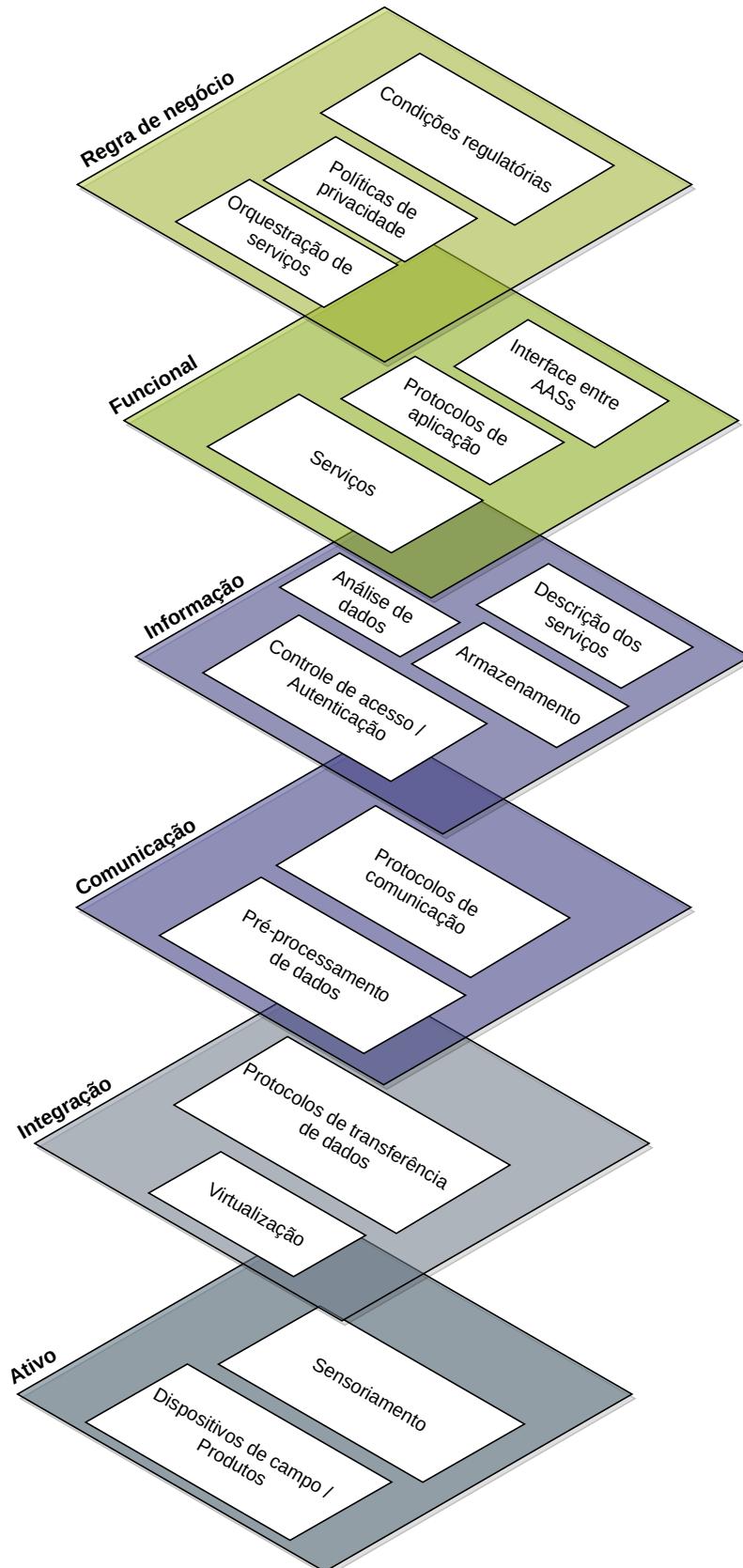
Para os WSs, outra função importante da camada Regra de Negócio é a orquestração dos serviços, que se refere ao gerenciamento dos serviços oferecidos. Quando os serviços são oferecidos em forma de contêiners, o orquestrador de serviços permite a escalabilidade da capacidade de trabalho, permitindo a invocação ou remoção de contêiners de acordo com a demanda de um determinado serviço. Alguns orquestradores de contêiners podem ser citados, como o Kubernetes, Docker Swarm e OpenShift.

O conjunto de todas estas camadas representa um Componente I4.0. Para cada tipo de operação relacionada a um Componente I4.0, 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. Estas considerações são cobertas pelo eixo Ciclo de Vida e Cadeia de Valor e considerações sobre este eixo envolvendo a arquitetura proposta baseada em WSs será apresentada no [Capítulo 5](#).

A [Figura 27](#) apresenta os componentes da arquitetura de fornecimento de WSs sob a visão das camadas do RAMI4.0.

Figura 27 – Camadas do RAMI4.0 com os componentes da arquitetura baseada em WSSs.

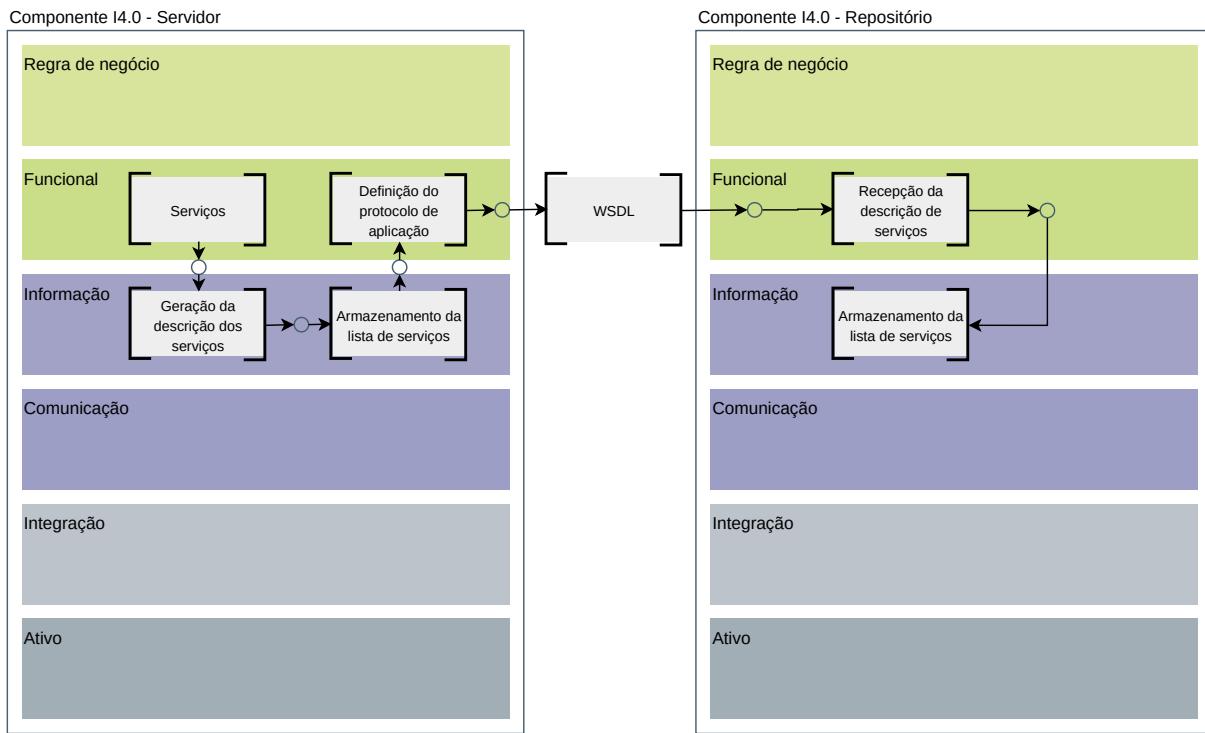


Fonte: O autor.

4.3.2 Operação de Publicação

A Figura 28 apresenta diagramas PFS do fluxo de dados para a operação de publicação de um AAS Servidor em um Repositório.

Figura 28 – Diagrama PFS da operação de publicação.

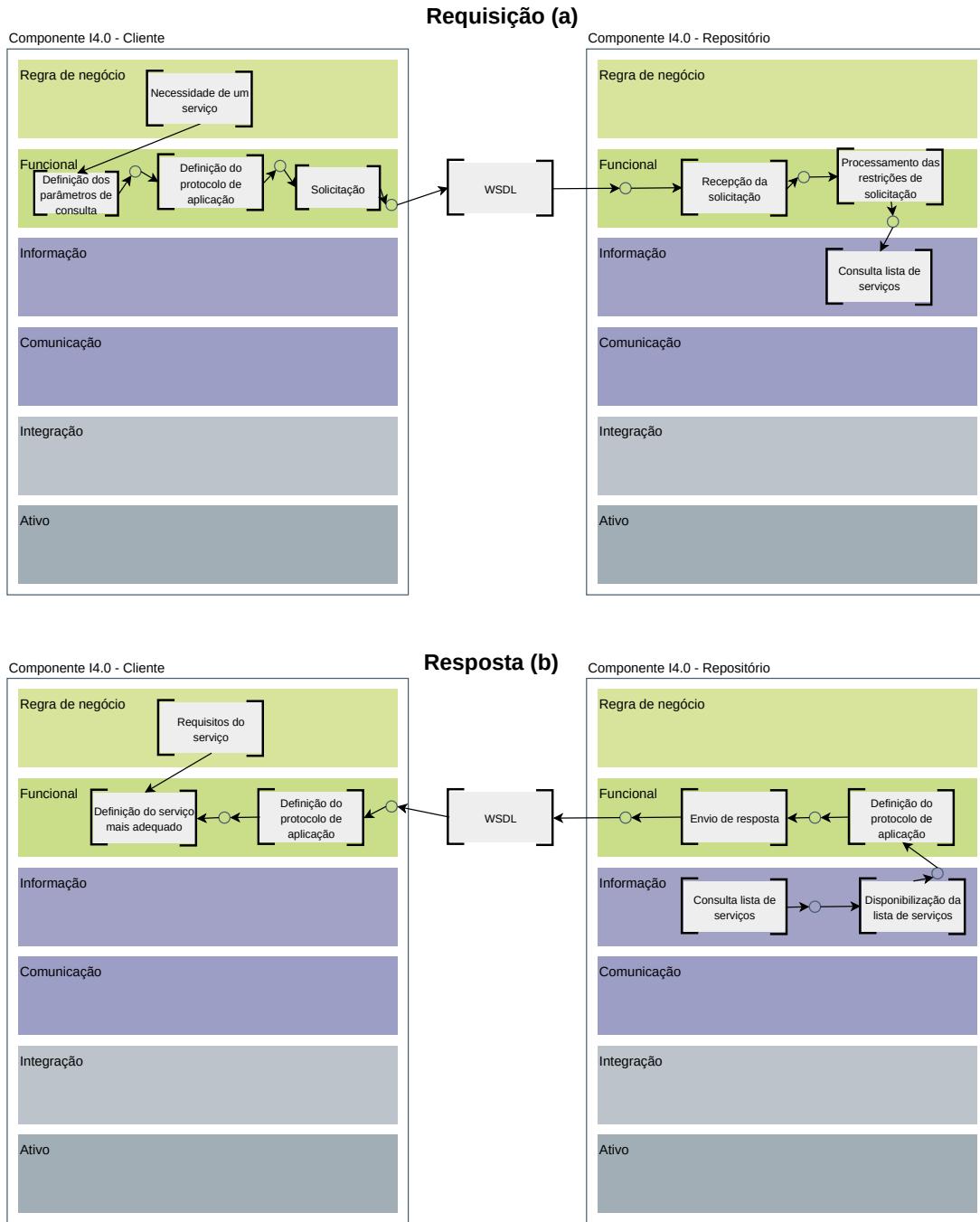


Fonte: O autor.

4.3.3 Operação de Busca

A Figura 29 apresenta diagramas PFS do fluxo de dados para a operação de busca de um AAS Cliente e um Repositório. A operação de busca é dividida em duas partes: a requisição e a resposta.

Figura 29 – Diagrama PFS das duas partes da operação busca: (a) Requisição e (b) Resposta.

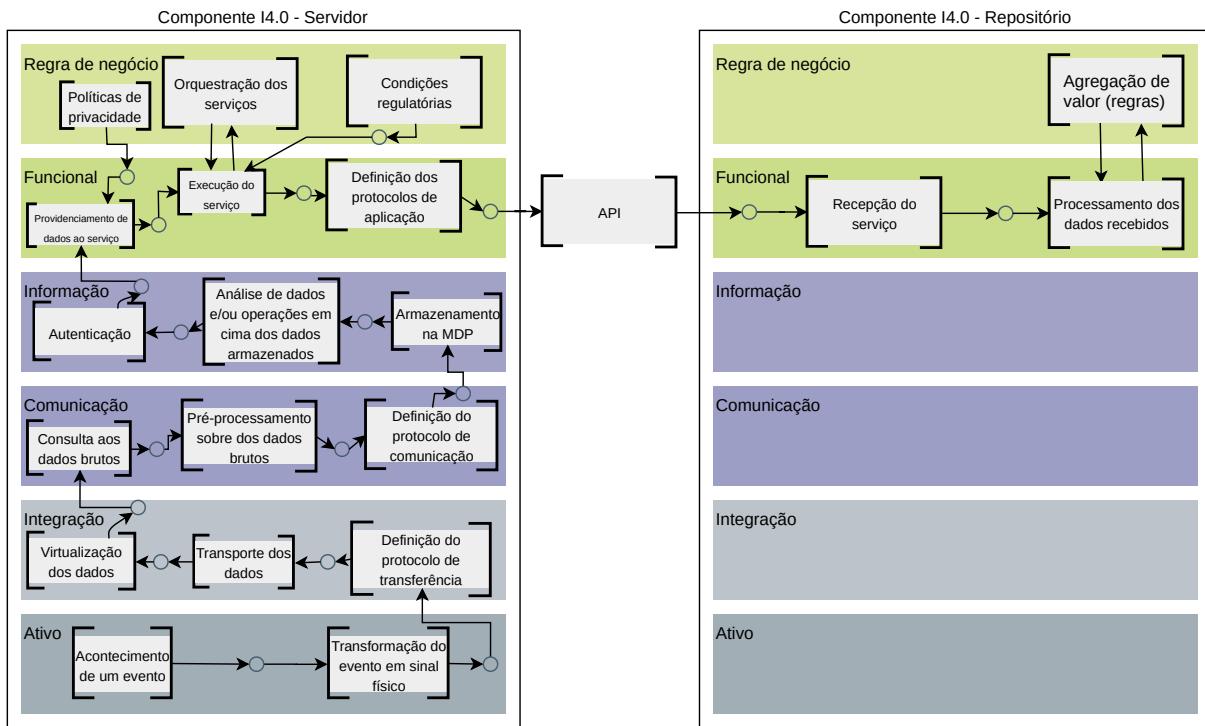


Fonte: O autor.

4.3.4 Operação de Interação

A Figura 30 apresenta diagramas PFS do fluxo de dados para a operação de interação de um AAS Servidor e um AAS Cliente.

Figura 30 – Diagrama PFS da operação de interação.



Fonte: O autor.

5 A MDP e o ciclo de vida do produto

Este capítulo visa trazer 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 baseado em dados (*data-driven*).

Uma visão da MDP sob o eixo “Ciclo de Vida e Cadeia de Valor” do RAMI4.0 é abordada, discutindo melhor o porquê e as atribuições dos AASs 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 Presente desde a concepção/conceitualização até os primeiros protótipos/testes. O “tipo” de um ativo é definido e propriedades e funcionalidades distintas são definidas e implementadas. Todos os artefatos de design (interno) são criados, como dados CAD, esquemas, software incorporado e associados ao tipo de ativo. Aumentando a capacidade de produção. As informações ‘externas’ associadas ao ativo são criadas, como folhas de dados técnicos, informações de marketing. O processo de venda é iniciado.

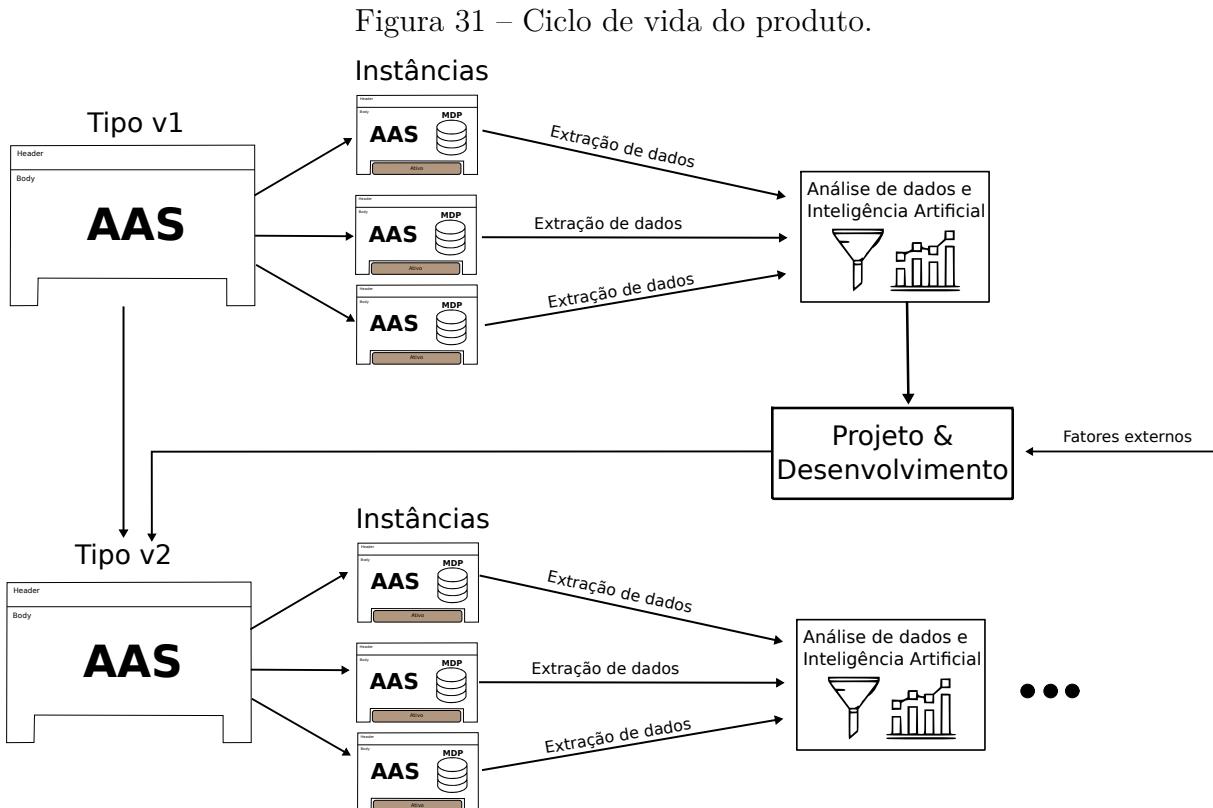
As **instâncias** são criadas/produzidas com base nas informações de um tipo de ativo. Informações específicas sobre produção, logística, qualificação e teste estão associadas às instâncias do ativo. Fase de uso pelo comprador das instâncias do ativo. Os dados de uso estão associados à instância do ativo e podem ser compartilhados com outros parceiros da cadeia de valor, como o fabricante da instância do ativo. Também inclui: manutenção, re-design, otimização e desativação da instância do ativo. O histórico completo do ciclo de vida está associado ao ativo e pode ser arquivado ou compartilhado para documentação.

Esse relacionamento deve ser mantido ao longo da vida das instâncias do ativo. Por esse relacionamento, as atualizações nos tipos de ativos podem ser encaminhadas para as instâncias de ativos, automaticamente ou sob demanda ([BADER et al., 2019](#)).

Os relacionamentos entre tipos e instância são cílicos e possibilitam a retroalimentação de informações. Para os ativos do produto, por exemplo, informações sobre o uso e manutenção de instâncias do produto armazenadas na MDP podem melhorar a fabricação de novos produtos, além de causar melhorias no projeto do próximo tipo de produto.

Portanto, o fluxo de informações entre tipos e instâncias de um produto são essenciais para a melhoria do projeto do produto. A [Figura 31](#) 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'.



Fonte: O autor.

5.2 Modelos de negócio orientados por dados

5.2.1 Desenvolvimento do produto orientado por dados

Lore 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 Prova de conceito

Para o fornecimento e consumo de serviços entre AAS Clientes e Servidores, diversas protocolos e tecnologias podem ser adotadas.

Este capítulo tem o objetivo de apresentar uma implementação funcional da arquitetura apresentada no [Capítulo 4](#) como prova de conceito, adotando alguns protocolos e tecnologias atualmente comuns meio da engenharia de *software* e desenvolvimento de sistemas.

6.1 Arquitetura do WS e tecnologias utilizadas

O protocolo de comunicação para o fornecimento de WSs mais comumente aplicado atualmente é o HTTP ([GRÜNER; PFROMMER; PALM, 2016](#)), seguindo as regras de operações padronizadas definidas pelo padrão REST.

Alguns outros protocolos também são aplicados para oferecimentos de WSs, como o MQTT, que está presente principalmente na área de automação residencial e IoT ([YOKOTANI; SASAKI, 2016](#)).

6.2 Estruturação dos dados da MDP

A estrutura proposta usa o padrão de troca de dados JSON, que utiliza texto legível a humanos, no formato atributo-valor (natureza auto-descritiva). O um modelo de transmissão de informações no formato JSON é muito usado em WSs que usam transferência de estado representacional (REST) e aplicações AJAX, substituindo o uso do XML.

A estrutura de armazenamento implementada usa banco de dados orientado a documentos que usa documento em formato JSON com esquemas pré-definidos.

A [Figura 32](#) mostra um exemplo de estruturação de dados para troca e armazenamento de informações em JSON.

6.3 API de interação Cliente-Servidor

Para fins de escrita e pelo Cliente a fins de leitura é realizado por meio de uma API REST.

A API REST é invocada como uma interface para acesso aos serviços de um AAS Servidor, podendo extrair dados internos de sua MDP e executar operações CRUD (criação, leitura, atualização e exclusão).

Figura 32 – Formato de intercâmbio de informações da MDP em JSON.

```
▼ [  
  ▼ {  
    "isAvailable": false,  
    "_id": "5ec29a02ffda7424b32447f6",  
    "namePlate": "IIOT ready Logic and Motion Controller",  
    "manufacturer": "Schneider Electric",  
    "description": "IIOT ready Logic and Motion Controller",  
    "country": "Germany",  
    "createdAt": "2020-05-18T14:21:54.732Z",  
    "updatedAt": "2020-05-18T14:23:50.943Z",  
    "__v": 2  
  },  
  ▼ {  
    "isAvailable": false,  
    "_id": "5ec29fc6ffda7424b32447f9",  
    "namePlate": "Festo OVEL Vacuum generator",  
    "manufacturer": "Festo AG & Co. KG",  
    "description": "OVEL Vakuumsaugdüse",  
    "country": "Germany",  
    "createdAt": "2020-05-18T14:46:30.848Z",  
    "updatedAt": "2020-05-18T14:46:30.848Z",  
    "__v": 0  
  }  
]
```

Fonte: O autor.

7 Publicações decorrentes do trabalho

Publicação 1:

- 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:

- 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

8 Cronograma detalhado

O cronograma planejado é mostrado na [Tabela 6](#).

Tabela 6 – Cronograma detalhado de atividades

Etapas	2018		2019						2020			
	set/ out	nov/ dez	jan/ fev	mar/ abr	mai/ jun	jul/ ago	set/ out	nov/ dez	jan/ fev	mar/ abr	mai/ jun	jul/ ago
Cumprimento dos créditos	C	C	C	C	C	C						
Levantamento bibliográfico	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	A
Desenvolvimento do projeto			C	C	C	C	C	C	A	A	A	
Exame de Qualificação										A		
Defesa da dissertação												A

Fonte: O autor.

A data estipulada para defesa da dissertação pode ser adiada conforme necessidade para refinamento do projeto, adicionando-se mais meses para levantamento bibliográfico e desenvolvimento do projeto, respeitando de toda forma 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.

9 Conclusão

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.

(ARUVÄLI; MAASS; OTTO, 2014) (TORO; BARANDIARAN; POSADA, 2015)
(VAIDYA; AMBAD; BHOSLE, 2018) .

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 25.

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 3 vezes nas páginas 33, 35 e 37.

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 23, 37, 38, 55 e 61.

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 45.

ARUVÄLI, T.; MAASS, W.; OTTO, T. Digital object memory based monitoring solutions in manufacturing processes. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 69, p. 449–458, 2014. Citado na página 71.

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 4 vezes nas páginas 39, 40, 52 e 61.

BALLOU, R. H. *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial.* [S.l.]: Bookman Editora, 2006. Citado na página 17.

BEDENBENDER, H. et al. Examples of the asset administration shell for industrie 4.0 components - basic part. *ZVEI White Paper*, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.

BELL, M. Service-oriented modeling. *John Wiley & Sons, Inc*, Wiley Online Library, 2008. Citado na página 42.

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 46.

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 32.

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 24, 41 e 42.

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 43.

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 19 e 20.

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 17.

DORST, W. et al. *Implementation Strategy Industrie 4.0*. [S.l.]: Bitkom e.V., VDMA e.V., ZVEI e.V., 2016. Citado na página 35.

DRATH, R.; ALEXANDER, H. Industrie 4.0: hit or hype? *Industrial Electronics Magazine*, v. 8, n. 2, p. 56–58, 2014. Citado na página 34.

FERRIS, C. Web services architecture. *Standard, W3C World*, W3C Working Group, p. 10, 2004. Citado na página 45.

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 46.

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 36, 37, 38 e 39.

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 25 e 34.

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 43.

GOTTSCHALK, K. et al. Introduction to web services architecture. *IBM systems Journal*, IBM, v. 41, n. 2, p. 170–177, 2002. Citado na página 44.

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 43.

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 2 vezes nas páginas 56 e 65.

HANKEL, M.; REXROTH, B. The reference architectural model industrie 4.0 (rami 4.0). *ZVEI, April*, v. 410, 2015. Citado na página 25.

- 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 5 vezes nas páginas 11, 21, 22, 32 e 35.
- 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 25 e 26.
- HUGOS, M. H. *Essentials of supply chain management*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- IEC. *Smart manufacturing – Reference architecture model industry 4.0 (RAMI4.0)*. [S.l.]: IEC PAS 63088 - International Electrotechnical Commission, 2017. Citado na página 54.
- JENSEN, K. *Coloured Petri nets - Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use*. [S.l.: s.n.], 1997. v. 3. Citado na página 29.
- 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 25 e 31.
- 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 25, 34 e 35.
- 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 45.
- 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 5 vezes nas páginas 21, 25, 31, 33 e 34.
- 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 17.
- LEVITT, T. Exploit the product life cycle. *Harvard business review*, v. 43, p. 81–94, 1965. Citado na página 19.
- LIU, M. J. *Managing the Marketing Risk*. 2010. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/umiss/mmm2>>. Citado na página 20.
- 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 41.
- 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 45.
- 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 25.

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 23 e 38.

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 2 vezes nas páginas 40 e 53.

PORTER, M. E. Competitive advantage: Creating and sustaining superior performance. *Competitive advantage*, v. 167, p. 167–206, 1985. Citado na página 18.

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 19.

RADACK, G. Industrial automation systems and integration—exchange of characteristic data — part 10: Characteristic data exchange format. 2009. Citado na página 52.

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 34 e 35.

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 33.

SCHWAB, K. *The fourth industrial revolution*. [S.l.]: Currency, 2016. Citado na página 32.

SIEPEN, S. *Manufacturing-as-a-Service*. LinkedIn articles, 2019. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/manufacturing-as-a-service-sven-siepen/>>. Citado na página 45.

SOUT, S. *Orquestração de sistemas produtivos dispersos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.

STARK, J. Product lifecycle management. In: *Product lifecycle management (Volume 1)*. [S.l.]: Springer, 2015. p. 1–29. Citado na página 31.

TORO, C.; BARANDIARAN, I.; POSADA, J. A perspective on knowledge based and intelligent systems implementation in industrie 4.0. *Procedia Computer Science*, Elsevier, v. 60, p. 362–370, 2015. Citado na página 71.

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 19 e 33.

VAIDYA, S.; AMBAD, P.; BHOSLE, S. Industry 4.0 - a glimpse. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 20, p. 233–238, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 71.

WAHLSTER, W. Digital product memory: Embedded systems keep a diary. *Hartung tec. News*, v. 15, p. 7–9, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 25.

- WAHLSTER, W. *Industrie 4.0: Active Semantic Product Memories for Smart Factories.* [S.l.]: IDA 30th Year Celebration Seminar Linköping, 2013. Citado na página 32.
- WAHLSTER, W. *SemProM: Foundations of Semantic Product Memories for the Internet of Things.* [S.l.]: Springer, 2013. Citado na página 25.
- 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 25.
- 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 39.
- 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 2 vezes nas páginas 56 e 65.
- ZüHLKE. *Push digital innovation.* 2020. Disponível em: <<https://www.zuehlke.com/at/en/industries/machinery-electronics-and-metal-industries/>>. Citado na página 24.