

Henrique Abrantes Vitoi

**Compartilhamento da memória digital do produto na
cadeia de suprimentos no contexto da Indústria 4.0**

São Paulo
2022

Henrique Abrantes Vitoi

Compartilhamento da memória digital do produto na cadeia de suprimentos no contexto da Indústria 4.0

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
2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação-na-publicação

Vitoi, Henrique Abrantes

Compartilhamento da memória digital do produto na cadeia de suprimentos no contexto da Indústria 4.0 / H. A. Vitoi -- São Paulo, 2022.
87 p.

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

1.Indústria 4.0 2.RAMI4.0 3.Memória digital do produto 4.Cadeia de suprimentos 5.Web services I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

Resumo

Indústria 4.0 (I4.0) se refere às recentes modificações em relação às tecnologias de manufatura. Neste contexto, redes inteligentes de equipamentos passam a proporcionar um alto nível de automação e intercâmbio de informações entre os elementos em um ambiente de manufatura. Por outro lado, logística se refere ao gerenciamento do fluxo de coisas (físicas ou digitais) entre um ponto de origem e um ponto de consumo, entre as quais inclui o fluxo de informações. Visto a relevância do compartilhamento de informações para a I4.0 e para a logística, este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma arquitetura que possibilita o compartilhamento de informações relacionadas ao ciclo de vida de um produto enquanto este trafega pela cadeia de suprimentos (CS). A arquitetura desenvolvida é baseada no Modelo de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0 (RAMI4.0) e permite compartilhar a Memória Digital do Produto (MDP) entre os elos da CS por meio de *Web Services*. Este trabalho aborda também a modelagem de dados dos submodelos de um Componente 4.0 (C4.0) e as considerações sobre o impacto em geração de valor que o compartilhamento destas informações traz sobre o negócio. Por fim, a definição de uma arquitetura como a abordada neste trabalho é essencial para que haja consistência e interoperabilidade na forma de interação entre os elos de uma CS.

Palavras-chave: Indústria 4.0. RAMI4.0. Memória digital do produto. Cadeia de suprimentos. Web services.

Abstract

Industry 4.0 (I4.0) refers to the recent changes in manufacturing technologies. In this context, intelligent equipment networks provide a high level of automation and information exchange between the elements in a manufacturing environment. On the other hand, logistics refers to the management of the flow of things (physical or digital) between a point of origin and a point of consumption, among which it includes the flow of information. Given the relevance of the information sharing on I4.0 and logistics, this work has as main goal the development of an architecture that allows the sharing of information related to the product life cycle as it moves throughout the supply chain (SC). The architecture developed is based on the Reference Architecture Model Industry 4.0 (RAMI4.0) and allows sharing the Digital Product Memory (DPM) between the SC members through *Web Services*. This work also addresses the data modeling of the submodels of a Component 4.0 (C4.0) and considerations about the impact on value generation that the sharing of this information brings to the business. Finally, the definition of an architecture as discussed in this work is essential for the consistency and interoperability on the way that the members of a SC interact with each other.

Keywords: Industry 4.0. RAMI4.0. Digital product memory. Supply chain. Web services.

Listas de ilustrações

Figura 1 – As revoluções industriais.	13
Figura 2 – Representação do RAMI4.0.	15
Figura 3 – Temas-chave de pesquisa e desenvolvimento em I4.0.	16
Figura 4 – Evolução da indústria por meio das revoluções industriais.	20
Figura 5 – Transição do (a) modelo hierárquico tradicional de gestão e controle para o (b) modelo flexível de comunicação entre dispositivos na I4.0.	21
Figura 6 – Avanços tecnológicos que moldam a I4.0.	22
Figura 7 – (a) Representação completa do RAMI4.0 e (b) detalhamento do eixo “Camadas”.	24
Figura 8 – (a) Representação completa do RAMI4.0 e (b) detalhamento do eixo “Ciclo de Vida e Cadeia de Valor”.	25
Figura 9 – (a) Representação completa do RAMI4.0 e (b) detalhamento do eixo “Níveis Hierárquicos do RAMI4.0”.	27
Figura 10 – Representação do AAS.	28
Figura 11 – Exemplificação de um AAS para um servomotor, incluindo os submodelos de identificação, dados técnicos, dados operacionais e documentação.	29
Figura 12 – Exemplo de processos de fabricação de um ativo (uma máquina) detalhados por meio de submodelos.	30
Figura 13 – Exemplo de CS estendida.	31
Figura 14 – Cadeia de valor de Porter.	32
Figura 15 – Estágios do ciclo de vida do produto.	34
Figura 16 – Modelo de ciclo de vida do produto com renovação do produto.	34
Figura 17 – Coleta de dados do produto ao longo da CS.	36
Figura 18 – Comunicação entre ativos em um sistema (a) sem <i>middleware</i> e (b) com <i>middleware</i> .	37
Figura 19 – Componentes de um WS e operações.	39
Figura 20 – Diagrama com os atores e interações em um WS.	40
Figura 21 – Elementos do PFS.	44
Figura 22 – Tipos de fluxo no PFS.	45
Figura 23 – Integração da MDP ao C4.0.	48
Figura 24 – Submodelos do C4.0-Produto e suas propriedades.	49
Figura 25 – Ciclo de vida do produto.	56
Figura 26 – Componentes e operações.	62
Figura 27 – Diagrama PFS das operações.	64
Figura 28 – Exemplificação das operações de publicação e busca com múltiplos C4.0-Clientes.	65

Figura 29 – Exemplificação das operações de publicação e busca com múltiplos produtos.	67
Figura 30 – Camadas do RAMI4.0 com os elementos envolvidos no compartilhamento de informações (fornecimento de serviços).	70
Figura 31 – Diagrama PFS da operação de publicação.	71
Figura 32 – Diagrama PFS da requisição em uma operação de busca.	72
Figura 33 – Diagrama PFS da resposta em uma operação de busca.	74
Figura 34 – Diagrama PFS da requisição de um serviço em uma operação de interação.	75
Figura 35 – Diagrama PFS da resposta de um C4.0-Servidor ao se solicitar um serviço.	76

Lista de tabelas

Tabela 1 – Princípios para implantação da I4.0 baseados em Hermann, Pentek e Otto (2016)	20
Tabela 2 – Eixos do RAMI4.0	24
Tabela 3 – Mapeamento dos métodos HTTP em um serviço <i>RESTful</i>	42
Tabela 4 – Propriedades do submodelo “Dados Gerais”	50
Tabela 5 – Propriedades do submodelo “Processos”	51
Tabela 6 – Propriedades do submodelo “Inventário”	53
Tabela 7 – Propriedades do submodelo “Pedido”	54
Tabela 8 – Propriedades do submodelo “Operação”	54
Tabela 9 – Propriedades do submodelo “Documentação”	55
Tabela 10 – Componentes da arquitetura proposta	62
Tabela 11 – Operações do WS para a interação entre C4.0s	63

Lista de abreviaturas e siglas

AAS	<i>Asset Administration Shell</i> (Casca Administrativa do Ativo)
API	<i>Application Programming Interface</i> (Interface de Programação de Aplicação)
BD	Banco de Dados
BI	<i>Business Intelligence</i> (Inteligência Empresarial)
BOM	<i>Bill of Materials</i> (Lista de Materiais)
C4.0	Componente 4.0
CRUD	<i>Create, Read, Update, Delete</i> (Criação, Leitura, Atualização, Exclusão)
CS	Cadeia de Suprimentos
CV	Cadeia de Valor
CVP	Ciclo de Vida do Produto
GCVP	Gestão do Ciclo de Vida do Produto
GI	Gestão da Informação
I4.0	Indústria 4.0
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i> (Internet das Coisas Industrial)
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i> (Notação de Objeto do JavaScript)
LGPD	Lei Geral de Proteção de Dados
MDP	Memória Digital do Produto
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i> (Eficiência Global do Equipamento)
OSI	<i>Open System Interconnection</i> (Interconexão Aberta de Sistemas)
PFS	<i>Production Flow Schema</i> (Esquema de Fluxo de Produção)
QoS	<i>Quality of Service</i> (Qualidade de Serviço)
RAMI4.0	<i>Reference Architecture Model Industry 4.0</i> (Modelo de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0)

REST	<i>Representational State Transfer</i> (Transferência Representacional de Estado)
RFID	<i>(Radio-Frequency IDentification)</i> (Identificação por Radiofrequência)
SOA	<i>Service Oriented Architecture</i> (Arquitetura Orientada a Serviços)
SOAP	<i>Simple Object Access Protocol</i> (Protocolo para Simples Acesso de Objetos)
SED	Sistemas a Eventos Discretos
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
UUID	<i>Universal Unique IDentifier</i> (Identificador Único Universal)
WS	<i>Web Service</i> (Serviço Web)
WSD	<i>Web Services Description</i> (Descrição do Serviço Web)
WSDL	<i>Web Services Description Language</i> (Linguagem de Descrição de Serviços Web)
XML	<i>Extensible Markup Language</i> (Linguagem Extensível de Marcação)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Motivação	14
1.2	Objetivos	17
1.3	Estrutura do trabalho	17
2	FUNDAMENTOS	19
2.1	Indústria 4.0 (I4.0)	19
2.1.1	Modelo de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0 (RAMI4.0)	23
2.1.2	Asset Administration Shell (AAS)	27
2.2	Logística & Cadeia de Suprimentos (CS)	29
2.2.1	Logística 4.0	32
2.3	Ciclo de vida do produto	33
2.4	Memória digital do produto (MDP)	35
2.5	Arquitetura orientada a serviços (SOA)	36
2.5.1	Web Services (WS)	38
2.5.2	Transferência Representacional de Estado (REST)	40
2.6	Modelagem de sistemas	43
2.6.1	Production Flow Schema (PFS)	44
3	CICLO DE VIDA DO PRODUTO NA I4.0	47
3.1	Integração da MDP ao C4.0	47
3.2	Submodelos do C4.0-Produto	48
3.2.1	Submodelo “Dados Gerais”	50
3.2.2	Submodelo “Processos”	50
3.2.3	Submodelo “Inventário”	52
3.2.4	Submodelo “Pedido”	53
3.2.5	Submodelo “Operação”	54
3.2.6	Submodelo “Documentação”	55
3.3	Geração de valor por meio do compartilhamento da MDP	56
3.3.1	Melhoria operacional do produto	57
3.3.2	Melhoria de projeto do produto	59
4	ARQUITETURA PARA COMPARTILHAMENTO DE INFORMAÇÕES DO PRODUTO	61
4.1	Componentes e operações da arquitetura	61
4.1.1	Componentes	61

4.1.2	Operações	63
4.2	Fluxo de fornecimento de serviços	64
4.3	Mapeamento das operações para as camadas do RAMI4.0	66
4.3.1	Funcionalidades das camadas do RAMI4.0	67
4.3.2	Operação de Publicação	71
4.3.3	Operação de Busca	72
4.3.4	Operação de Interação	74
4.4	Considerações sobre a análise dinâmica do modelo	77
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
5.1	Trabalhos futuros	79
	REFERÊNCIAS	80

1 Introdução

O intercâmbio de informações é um tema chave da logística moderna. Este nicho é chamado de logística da informação e lida com o fluxo de informações entre humanos e/ou máquinas dentro ou entre organizações (HAFTOR; KAJTAZI; MIRIJAMDOTTER, 2011), que se agrupam formando uma rede de criação de valor por meio de informações.

Com o cenário de comércio em um mundo intrinsecamente globalizado, as Cadeias de Suprimentos (CS) e suas interdependências tornam-se mais complexas (SURANA et al., 2005). O compartilhamento de informações entre os elos da CS, portanto, torna-se uma forma de trazer mais eficiência ao seu funcionamento como um todo.

Quando se trata de informações relativas a um produto, o conceito de Memória Digital do Produto (MDP) pode ser utilizado como forma de coletar, armazenar e fornecer informações. A MDP se refere a sistemas que permitem a coleta de dados em todas as fases do ciclo de vida do produto para distribuição e/ou análise (WAHLSTER, 2007). Os dados de interesse do produto se relacionam a qualquer fase de sua CS, o que abrange dados de produção, montagem, distribuição (transporte) (BRANDHERM; KRONER, 2011), bem como padrões de uso pelo cliente final, etc.

O compartilhamento destas informações, geradas a partir de dados, favorece o desenvolvimento de novas versões do próprio produto e funciona também como um elo permanente entre o fornecedor e o cliente no pós-venda (BRANDHERM; KRONER, 2011), permitindo que o produto mantenha atualizações e quaisquer outras melhorias instantaneamente.

Tais conceitos se encaixam com a Indústria 4.0 (I4.0), que tem como fundamentos a inserção de novas tecnologias com o propósito de oferecer um alto nível de automação e intercâmbio de informações entre equipamentos e produtos (LASI et al., 2014).

Portanto, surge na I4.0 oportunidades para a criação de novas soluções centradas na transparência das informações pela CS (LASI et al., 2014) proporcionada pelo compartilhamento, além de novas metodologias para a extração e análise dessas informações para desenvolvimento de outros produtos aperfeiçoados.

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

A I4.0 surgiu a partir da crescente integração das TICs com os processos industriais, criando as bases para uma revolução industrial (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016). As modificações em relação às tecnologias de manufatura proporcionam 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 I4.0 se dá ao fato de ser considerada a quarta revolução com relação às

tecnologias de produção industrial, sendo as “revoluções industriais” consideradas evoluções tecnológicas que levaram a mudanças significativas na forma de produção da época. Tal histórico de revoluções no campo da indústria é ilustrado na [Figura 1](#).

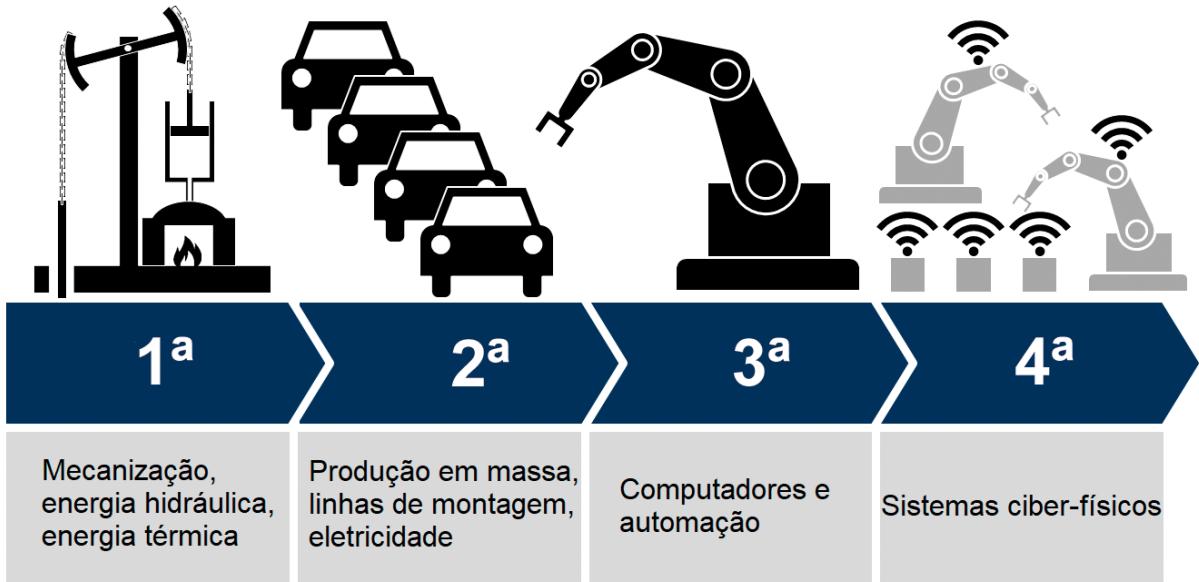


Figura 1 – As revoluções industriais.

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

Tais modificações são essenciais devido às novas necessidades da própria indústria e às mudanças de padrões de consumo do mercado. Isto acarreta transformações no cenário operacional. 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 demanda, são necessários procedimentos mais rápidos de tomada de decisão. Para isso, as hierarquias organizacionais precisam ser reduzidas, dando ao produto maior independência sobre seu próprio processo de fabricação;

- Eficiência de recursos: A maior eficiência sobre o uso dos recursos sempre é algo desejável, porém sua importância se intensifica com as tendências de aumento dos preços dos recursos, bem como a mudança social no contexto de aspectos ecológicos. Isto exige um foco mais intensivo em sustentabilidade, o que decorre em uma maior racionalidade (ou eficiência) na utilização dos recursos.

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

Estes princípios são diretrizes para o desenvolvimento de arquiteturas de sistemas 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). Um dos principais modelos de arquitetura para a I4.0 é o RAMI4.0 (Modelo de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0) (HANKEL; REXROTH, 2015). Esse modelo de arquitetura foi apresentado na feira industrial de Hanôver na Alemanha em abril de 2015.

Assim como o RAMI4.0, outros modelos de arquitetura para a I4.0 trazem propostas similares, como é o caso do IMSA (*Intelligent Manufacturing System Architecture*), IIRA (*Industrial Internet Reference Architecture*) e IVRA (*Industrial Value Chain Reference Architecture*) (LI et al., 2018). Porém, o RAMI4.0 é uma proposta mais abrangente e flexível em relação às novas tecnologias (HANKEL; REXROTH, 2015).

O RAMI4.0 é uma representação tridimensional dos aspectos de uma indústria moderna, conforme a [Figura 2](#).

Alguns dos conceitos introduzidos pelo RAMI4.0 são (BADER et al., 2019b):

- Componente 4.0 (C4.0): junção de um ativo físico com sua parte digital;
- Submodelo: representações de informações de um determinado ativo, incluindo suas características, propriedades, condições, parâmetros, dados de medições e capacidades.

O RAMI4.0, como o próprio nome diz, é um modelo de arquitetura. Isto significa que é um modelo a ser utilizado para a elaboração de outras arquiteturas e, desta forma, define as bases para a elaboração de arquiteturas de sistemas que sejam interoperáveis entre si.

1.1 Motivação

Os conceitos de I4.0 e MDP surgiram em 2011 (KAGERMANN; LUKAS; WAHLSTER, 2011) e 2007 (WAHLSTER, 2007), respectivamente. A área multidisciplinar de

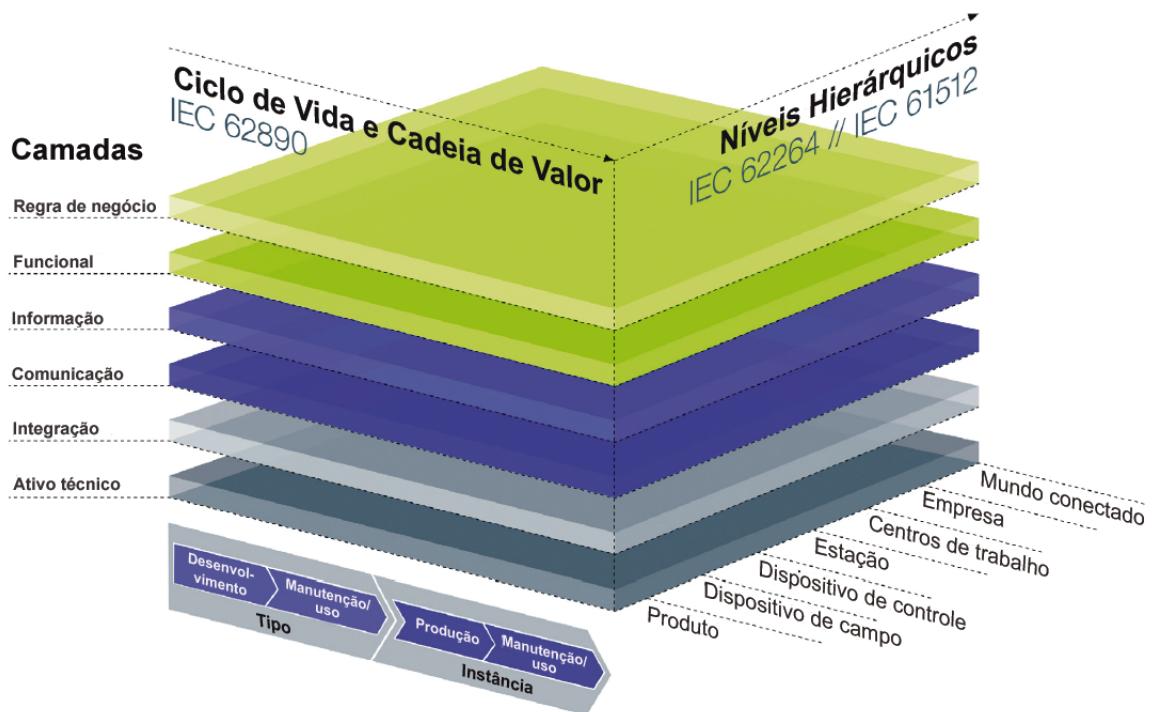


Figura 2 – Representação do RAMI4.0.

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

estudo envolvendo MDP e I4.0 surgiu em 2013 com o projeto SemProM (WAHLSTER, 2013b), porém ainda quando I4.0 era um tema abrangente sem diretrizes concretas para a sua implementação, o que ocorreria em 2013 por meio do documento de recomendações para implementação da iniciativa estratégica “Industrie 4.0” (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013), antes da criação do RAMI4.0, que seria divulgado em 2015 por um periódico alemão (HANKEL; REXROTH, 2015).

Alguns 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) implementaram sistemas envolvendo ambos os conceitos, porém sem considerações sobre CS.

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 RAMI4.0 com a MDP. I4.0 e a MDP são temas correlacionados, porém ainda não devidamente abordados em conjunto na literatura, o que aponta uma lacuna de conhecimento dentro de I4.0 a ser explorada.

Estudos sobre o RAMI4.0 são importantes no sentido de padronizar a implementação da I4.0 em empresas de diferentes negócios, garantindo assim a interoperabilidade dos serviços. Integrar a MDP ao RAMI4.0 enriquece o nível de discussão sobre essa arquitetura de referência visando 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; HIRSCH-KREINSEN et al., 2019b). O Conselho de Pesquisa da Plattform Industrie 4.0 é o comitê consultivo estratégico da Plattform Industrie 4.0 e identifica necessidades de pesquisa e ações em torno da I4.0. O comitê identificou e definiu quatro temas-chave de abordagens no setor tecnológico, econômico, metodológico e social/legal para se implementar com sucesso a I4.0 (HIRSCH-KREINSEN et al., 2019a), conforme mostrado na Figura 3. Isso significa que os tópicos elencados são temas com alto potencial de otimização de rotinas e processos de produção existentes no cenário de I4.0.

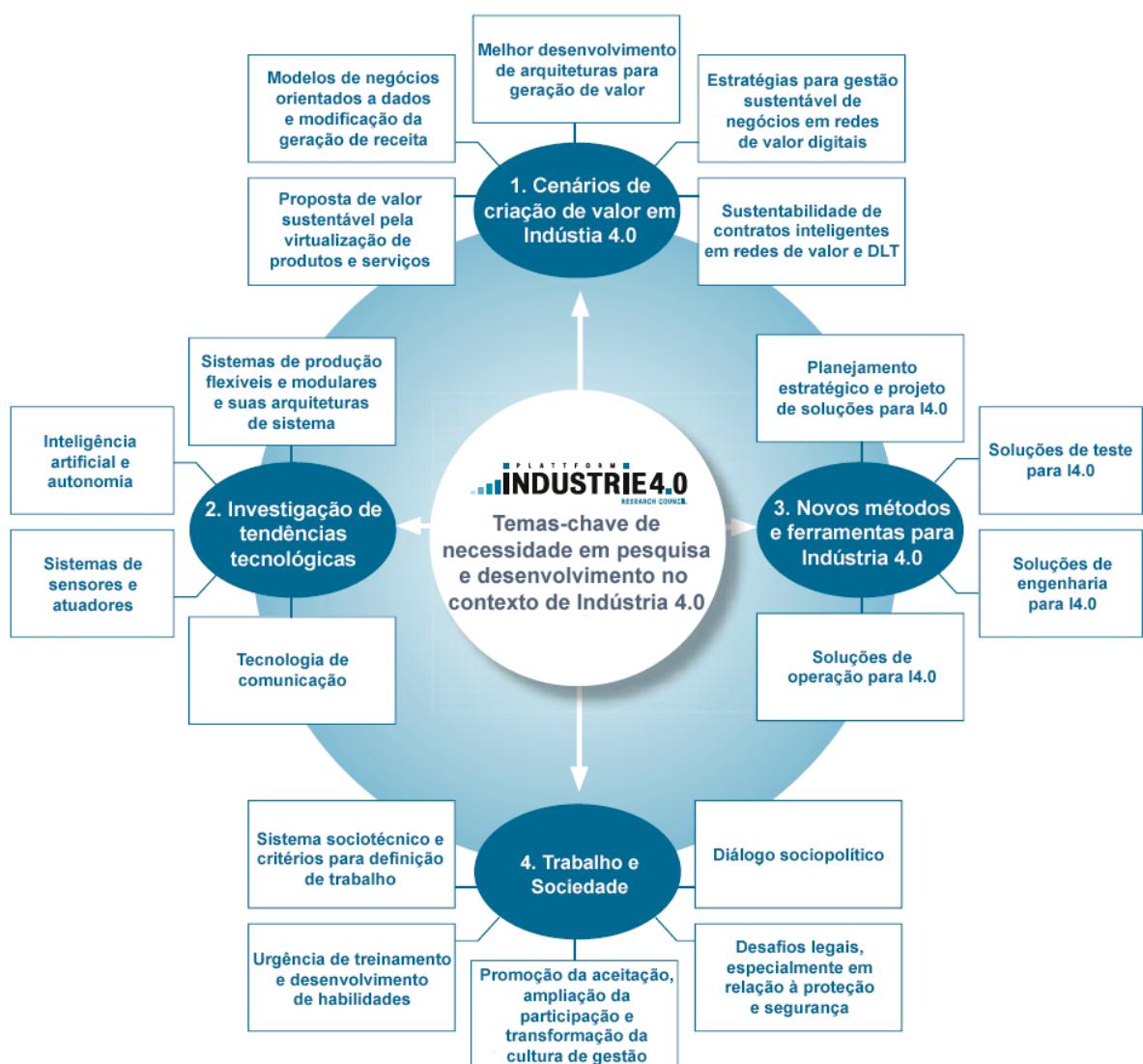


Figura 3 – Temas-chave de pesquisa e desenvolvimento em I4.0.

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

Dentre os temas elencados na Figura 3, destacam-se os subitens relacionados ao

tópico “Cenários de criação de valor em Indústria 4.0” por estarem altamente relacionados ao RAMI4.0 e à geração de valor por meio da MDP. Estes são temas de grande oportunidade dentro do cenário de I4.0, especialmente se considerados os métodos de análise de dados já estabelecidos.

1.2 Objetivos

Dadas as motivações do trabalho apresentadas na [seção 1.1](#), o objetivo deste trabalho é a elaboração de uma arquitetura baseada no RAMI4.0 para o compartilhamento da MDP ao longo da CS.

Para se alcançar o objetivo geral, este é desmembrado em metas, representadas pelos objetivos específicos, que são:

- **Integração da MDP ao C4.0** ([seção 3.1](#)): a MDP é incorporada ao C4.0 do produto para que assim esteja disponível para consulta pelos membros da CS na I4.0;
- **Levantamento de submodelos do produto e suas propriedades** ([seção 3.2](#)): as informações a serem compartilhadas pela CS devem estar encapsuladas em forma de submodelos e propriedades a fim de se adequarem ao RAMI4.0. Aqui são identificadas e classificadas as informações relevantes do produto de interesse aos membros da CS;
- **Levantamento dos impactos em geração de valor com o compartilhamento da MDP** ([seção 3.3](#)): as informações possuem potencial de geração de valor ao produto e ao negócio. Aqui são apontados estes impactos e como eles ocorrem durante o ciclo de vida do produto;
- **Detalhamento do componentes e operações da arquitetura** ([seção 4.1](#)): os componentes e operações principais da arquitetura são detalhados;
- **Descrição do processo de compartilhamento de informações** ([seção 4.2](#)): o fluxo das informações utilizando a arquitetura é analisado considerando a CS completa com todos os membros principais em cenários realísticos;
- **Mapeamento das operações para as camadas do RAMI4.0** ([seção 4.3](#)): a arquitetura é analisada com relação à interação entre cada par de C4.0s em cada camada do RAMI4.0;

1.3 Estrutura do trabalho

O capítulo de introdução ([Capítulo 1](#)) apresenta uma abordagem inicial dos conceitos que são tratados ao longo do trabalho, a motivação e objetivos da pesquisa.

O [Capítulo 2](#) apresenta a revisão bibliográfica com a fundamentação dos conceitos necessários para o desenvolvimento da arquitetura.

O [Capítulo 3](#) apresenta a proposta de integração da MDP ao C4.0 para a interoperabilidade dentro da I4.0.

O [Capítulo 4](#) apresenta a arquitetura proposta para o compartilhamento da MDP baseada no RAMI4.0.

Finalmente, no [Capítulo 5](#) são feitas as considerações sobre a pesquisa com comentários sobre os resultados alcançados e trabalhos futuros.

2 Fundamentos

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica para a fundamentação do trabalho.

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

A inter-relação entre esses conceitos é a base para o entendimento e desenvolvimento da arquitetura e para o estudo das implicações do compartilhamento de informações no ciclo de vida do produto no contexto da I4.0.

2.1 Indústria 4.0 (I4.0)

I4.0 é o nome dado às recentes inovações 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 ao fato de ser considerada a quarta revolução com relação às tecnologias de produção industrial, sendo as “revoluções industriais” consideradas evoluções tecnológicas que levaram a mudanças significativas na forma de produção da época. 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 4](#).

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

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

Embora o termo I4.0 seja bastante comum na discussão tecnológica atual, muitas empresas, centros de pesquisa e universidades não mantêm uma definição comum sobre o assunto. Segundo [Hermann, Pentek e Otto \(2016\)](#) e com base em uma revisão de literatura feita pelos mesmos autores, a I4.0 é composta por quatro princípios, conforme listados na [Tabela 1](#).

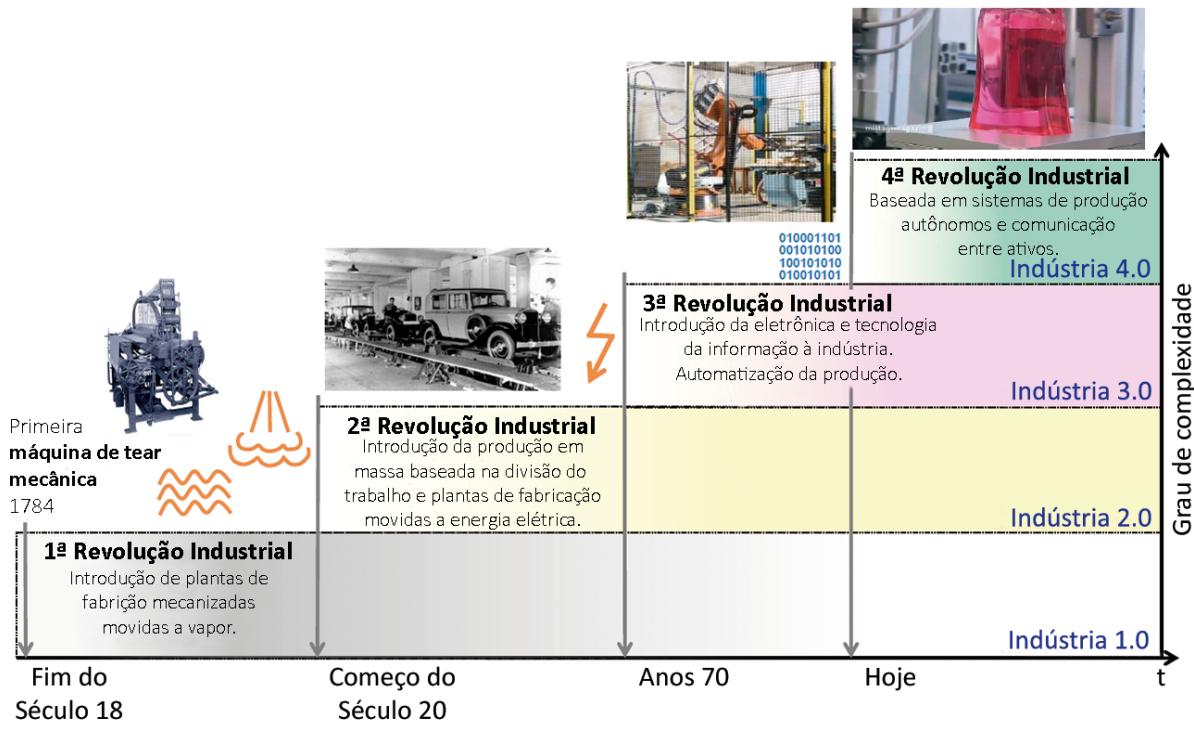


Figura 4 – Evolução da indústria por meio das revoluções industriais.

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

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

Princípio	Descrição
Interoperabilidade	Capacidade das coisas (ativos, 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 ativos conectados à rede. Informações do mundo digital como documentos eletrônicos, desenhos, modelos de simulação. E informações sobre o mundo real, como posição, dados de sensores de temperatura, vibração, etc.
Descentralização de decisões	Permitir a tomada de decisões baseada nas informações coletadas pelo próprio ativo e dar a ele 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 de decisões descentralizadas, os seres humanos precisam ser auxiliados por sistemas de assistência de forma a dar comprehensibilidade ao processo e às tomadas de decisão necessárias. Os sistemas de assistência devem agregar e tornar visualizáveis as informações de maneira comprehensível.

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

2018; VAIDYA; AMBAD; BHOSLE, 2018).

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

Esses ativos são inseridos no meio digital, onde podem trocar informações e executar funções sobre seus correspondentes reais de forma mais autônoma e com menor intervenção humana por meio do uso extensivo de recursos avançados de tecnologias da informação e comunicação (ADOLPH et al., 2018). Devido a essa maior interação entre ativos no sistema de fabricação, extingue-se a relação essencialmente hierarquizada de gestão e controle da indústria tradicional e, assim, estes ativos passam a deter a capacidade de se comunicarem diretamente uns com outros, conforme ilustrado na Figura 5.

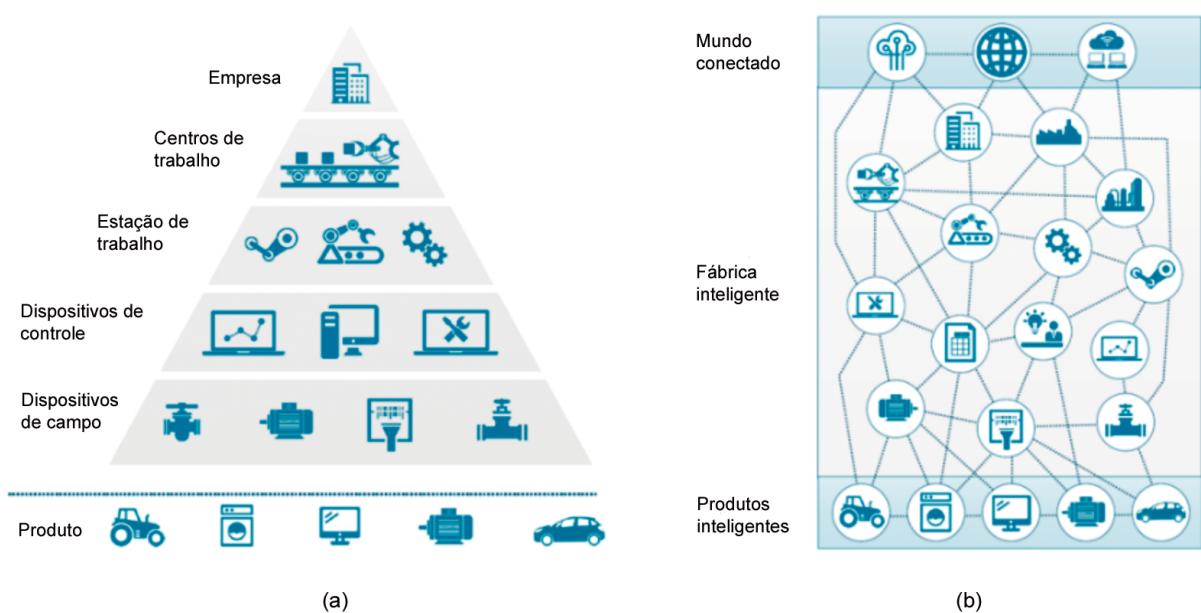


Figura 5 – Transição do (a) modelo hierárquico tradicional de gestão e controle para o (b) modelo flexível de comunicação entre dispositivos na I4.0.

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

Essa automatização dos ativos tem potencial para dar mais eficiência aos processos industriais, pois desta forma o sistema pode tomar decisões com base nas informações que lhe foram fornecidas por meio de sensores e identificadores (SCHMITTNER et al., 2017). A visão para o futuro da produção baseado na I4.0 envolve sistemas de manufatura modulares e eficientes em cenários nos quais os produtos controlam seus próprios processos de fabricação (LASI et al., 2014).

Há uma tendência global de redução do ciclo de vida do produto devido à rápida introdução de novas tecnologias para satisfazer a demanda dos clientes (TRAPPEY; WU, 2008). A I4.0 é um reflexo desta realidade onde os produtos possuem ciclos de vida curtos. Nesta realidade, o produto pode controlar o seu próprio processo de fabricação, facilitando, assim, ajustes e personalizações por parte do cliente, enquanto preserva os custos, a qualidade e o tempo de aprovisionamento (*lead time*) da produção em massa.

A I4.0 é composta por princípios a serem seguidos e implementados, porém o caminho para a implementação, assim como as tecnologias a serem adotadas podem ser diversos. As peculiaridades de cada indústria e de cada mercado estabelecem diferentes regras de negócios e, portanto, cada setor da indústria pode necessitar de diferentes formas e tecnologias para se implementar a I4.0 e se tornar uma fábrica inteligente. Alguns avanços tecnológicos, entretanto, são muito importantes ou essenciais para a implementação da I4.0 em qualquer sistema de manufatura, alguns deles são mostrados na Figura 6.

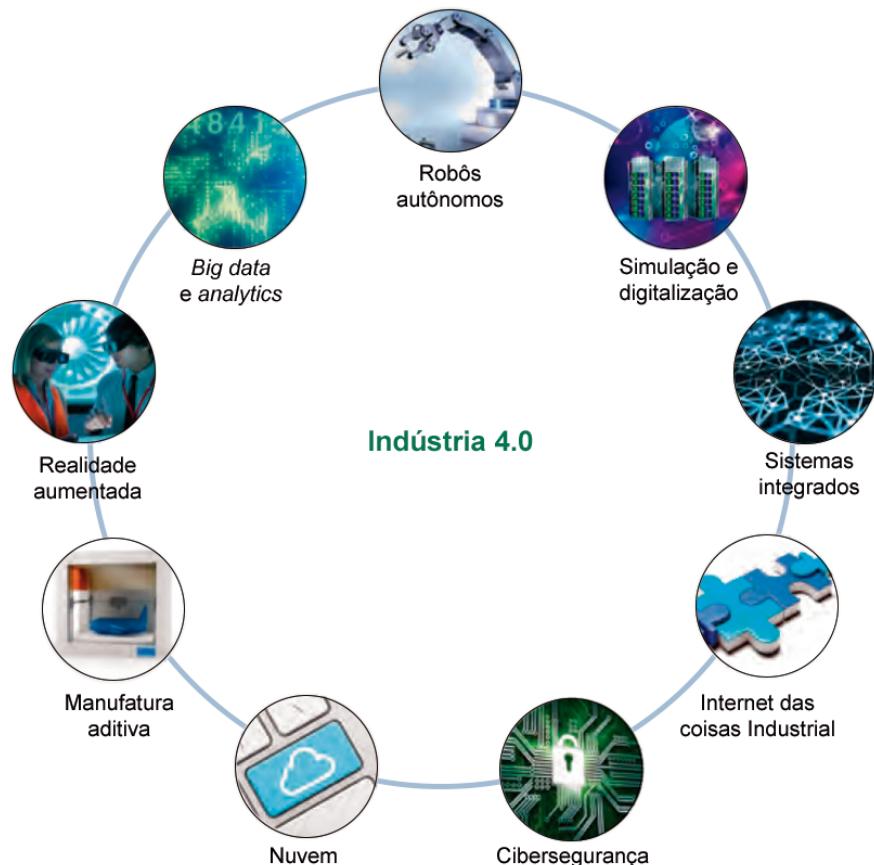


Figura 6 – Avanços tecnológicos que moldam a I4.0.

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 I4.0

como parte integral da iniciativa estratégica para a indústria alemã, visando liderança em inovação tecnológica (DRATH; ALEXANDER, 2014) como uma abordagem para fortalecer a competitividade de sua indústria manufatureira.

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

O impacto econômico dessa revolução industrial traz uma eficiência operacional substancialmente maior, bem como o surgimento de modelos de negócios, serviços e produtos 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. Embora a mudança completa para a I4.0 possa levar vários anos para ser concretizada (RÜßMANN et al., 2015), os avanços nesta área estabelecem os novos pioneiros e detentores de tecnologias e, portanto, é de interesse de cada país liderar a concorrência global a fim de se consolidar como mercado líder e fornecedor de soluções para a I4.0.

2.1.1 Modelo de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0 (RAMI4.0)

O RAMI4.0 é uma representação tridimensional que descreve todos os aspectos cruciais da I4.0. Dessa maneira, inter-relações complexas podem ser divididas em grupos menores e mais simples.

A Figura 2 mostra a representação do RAMI4.0 e a Tabela 2 fornece uma descrição detalhada de cada eixo.

A Figura 7 mostra o detalhamento de cada elemento do eixo “Camadas” do RAMI4.0 e sua associação ao modelo completo. O propósito de cada camada, começando da mais inferior (Ativo Técnico) para a mais elevada (Regra de Negócio), é descrito a seguir (DORST et al., 2016):

1. **Ativo Técnico:** Nesta camada estão os ativos reais, como, por exemplo, uma máquina, um *software*, uma documentação, uma ideia, etc. O trabalhador e seu conhecimento sendo aplicado é também um ativo. Nesta camada estão os fornecedores de dados, ou seja, os elementos que servirão como fonte de dados. Normalmente estes dados gerados pelo ativo são extraídos e monitorados para fins de controle da planta de produção;

Tabela 2 – Eixos do RAMI4.0.

Eixo	Descrição
Camadas	As seis camadas deste eixo descrevem a decomposição de um ativo em suas funcionalidades, que são cada uma das camadas deste eixo. Esta decomposição do ativo também é chamada de mapeamento virtual. A representação em camadas se origina das TIC, onde as funcionalidades de sistemas complexos são comumente divididas em camadas.
Ciclo de vida e Cadeia de valor	Este eixo representa o ciclo de vida dos ativos, com base na IEC 62890 para gerenciamento do ciclo de vida. Além disso, é feita uma distinção entre “tipos” e “instâncias”. Um “tipo” é criado na fase de desenvolvimento e, uma vez concluída esta fase, esse tipo é liberado para a produção, servindo como modelo para uma “instância”, que é quando ativo real foi fabricado está operando em produção.
Níveis hierárquicos	Neste eixo estão indicados os níveis hierárquicos da IEC 62264, a série de padrões internacionais para sistemas de TI e controle corporativos. Estes níveis representam as diferentes funcionalidades das fábricas. Para representar o ambiente I4.0, as funcionalidades foram expandidas em relação ao padrão internacional ISA-95, incluindo o “Produto”, o “Dispositivo de campo” e o “Mundo conectado”.

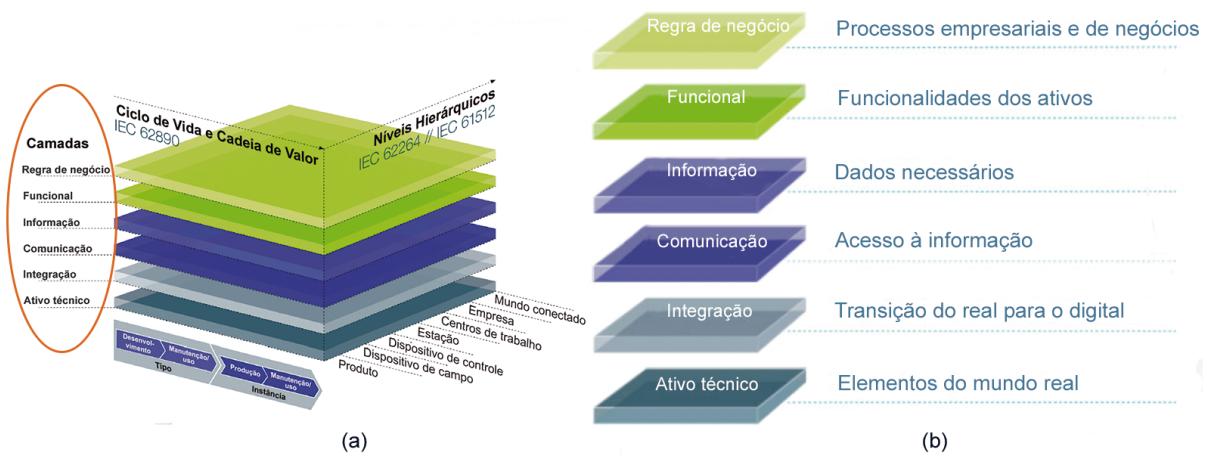


Figura 7 – (a) Representação completa do RAMI4.0 e (b) detalhamento do eixo “Camadas”.

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

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 digital. Se a realidade mudar, esse evento então é relatado à camada de integração e os dados são atualizados no mundo digital;
3. **Comunicação:** Camada responsável pela padronização da interação por meio da adoção de um formato de troca de dados uniforme entre os dispositivos. Esta camada é a responsável pela interoperabilidade entre os ativos na I4.0. Aqui ocorre a integração vertical, ou seja, a interação entre ativos dentro da mesma empresa. A camada de Comunicação fornece dados sobre o ativo à camada de informação;

4. **Informação:** Camada responsável pelo controle dos dados do ativo. Esta camada agrupa todos os dados sobre um determinado ativo e é responsável pelo gerenciamento desses dados. Na camada de informação são garantidos que os dados sejam tratados, pré-processados, armazenados e disponibilizados para os demais ativos do sistema;
5. **Funcional:** Camada responsável por manter a descrição formal de todas as funcionalidades do sistema. É também a camada responsável pela integração horizontal de ativos, ou seja, é a porta de interação entre C4.0 de diferentes empresas. Esta camada é a interface para o fornecimento de informações por meio de serviços para ativos fora da empresa;
6. **Regra de negócio:** Camada responsável por manter as regras de negócio que o sistema deve seguir como, por exemplo, as condições legais e regulatórias. Esta camada também é responsável por mapear os modelos de negócios e fornecer restrições operacionais da planta de produção.

Já o ordenamento do eixo “Ciclo de Vida e Cadeia de Valor” do RAMI4.0 é detalhado na [Figura 8](#), juntamente com seu destaque dentro do modelo completo. Este eixo é derivado da norma IEC 62890 ([ADOLPHS et al., 2015](#)). O seu objetivo é representar o estado de um C4.0 ao longo de toda a sua CS, ou seja, a representação de seu ciclo de vida.

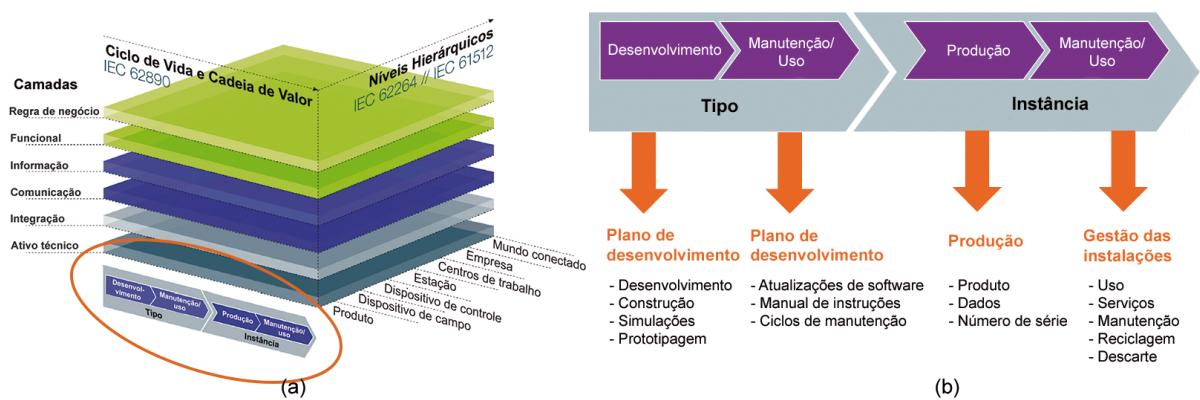


Figura 8 – (a) Representação completa do RAMI4.0 e (b) detalhamento do eixo “Ciclo de Vida e Cadeia de Valor”.

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

Neste eixo é feita a distinção fundamental entre “tipo” e “instância”, cada um correspondendo a uma fase em que o ativo se encontra ([ADOLPHS et al., 2015](#)).

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

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

Com a conclusão de todas as etapas de testes e validação, o “tipo” é liberado para produção em série. A partir de então, novos ativos podem ser instanciados com base no projeto validado até então.

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

As “instâncias” são criadas, produzidas ou fabricadas com base nas informações de um “tipo” de ativo. Informações específicas sobre produção, logística, qualidade e testes são associadas à “instância” do ativo.

As melhorias sobre um ativo 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 deste ativo.

Tanto nas fases “tipo” quanto “instância”, dados de uso e projeto são coletados e associados para então poderem ser armazenados na MDP de cada ativo e serem compartilhados com outros parceiros na CS.

A visão sobre “tipo” e “instância” apresentada se refere a um ativo como um produto, porém a representação de um ativo é genérica, podendo se aplicar também uma documentação, um processo, uma ideia, etc. Ativos estes que também possuem as respectivas fases referentes ao projeto e operação detalhadas.

O último eixo do RAMI4.0, “Níveis Hierárquicos”, é apresentado na [Figura 9a](#). Nesta representação, o último nível – “Mundo conectado” (não representado na [Figura 9b](#)) – é a interconexão e interoperabilidade entre diversas empresas, que por sua vez possuem todas as demais camadas inferiores listadas.

Este eixo é baseado em uma reformulação da IEC 62264, que é a série de padrões internacionais para sistemas de TI e controle corporativos ([HANKEL; REXROTH, 2015](#)), e faz uma alusão à pirâmide da automação industrial da ISA-95.

Os níveis hierárquicos representam as diferentes funcionalidades das fábricas. Para representar o ambiente I4.0, as funcionalidades foram expandidas além da IEC 62264, que já possui os níveis “Dispositivo de controle”, “Estação de trabalho”, “Centros de trabalho” e “Empresa”. Foram adicionados o nível “Produto” para descrever funcionalidades de manufatura, o nível “Dispositivo de campo” com considerações sobre dispositivos de campo inteligentes, e o nível “Mundo conectado” para descrever o grupo de fábricas e a colaboração entre empresas, fornecedores de componentes, consumidores, etc.

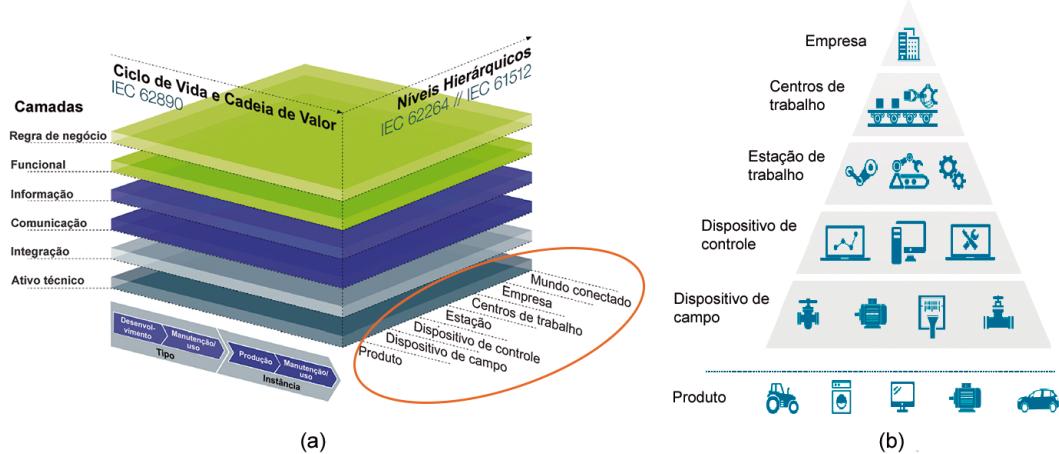


Figura 9 – (a) Representação completa do RAMI4.0 e (b) detalhamento do eixo “Níveis Hierárquicos do RAMI4.0”.

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

2.1.2 Asset Administration Shell (AAS)

Um ativo é qualquer coisa que precise ser conectada para agregar valor a um processo industrial ([BADER et al., 2019b](#)), ou seja, tudo que tem 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.

Na I4.0 cada ativo é encapsulado por um *software* que funciona como uma “concha” que administra todos os aspectos relacionados a este ativo. Esta “concha” do ativo técnico é denominada “Asset Administration Shell” (AAS). O AAS é a representação da parte digital de um ativo no mundo I4.0 ([Ye; Hong, 2019](#)).

Fazendo uma associação ao eixo “Camadas” do RAMI4.0, o AAS engloba as camadas: Regra de Negócio, Funcional, Informação e Comunicação; parte da camada Integração também é contemplada pelo AAS, já que essa é a conexão entre o ativo físico e o meio digital. Tal associação é representada pela [Figura 10](#).

O AAS consiste em vários submodelos nos quais são descritas todas as informações e funcionalidades de um determinado ativo, incluindo suas características, propriedades, condições, parâmetros, dados de medições e capacidades ([BADER et al., 2019b](#)). A [Figura 11](#) exemplifica um AAS contendo informações relevantes do ativo em forma de “submodelos”.

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

Os submodelos básicos são unidades de organização que se aplicam a muitos ou todos os ativos dentro do mundo I4.0. Já os submodelos livres são acordados entre os

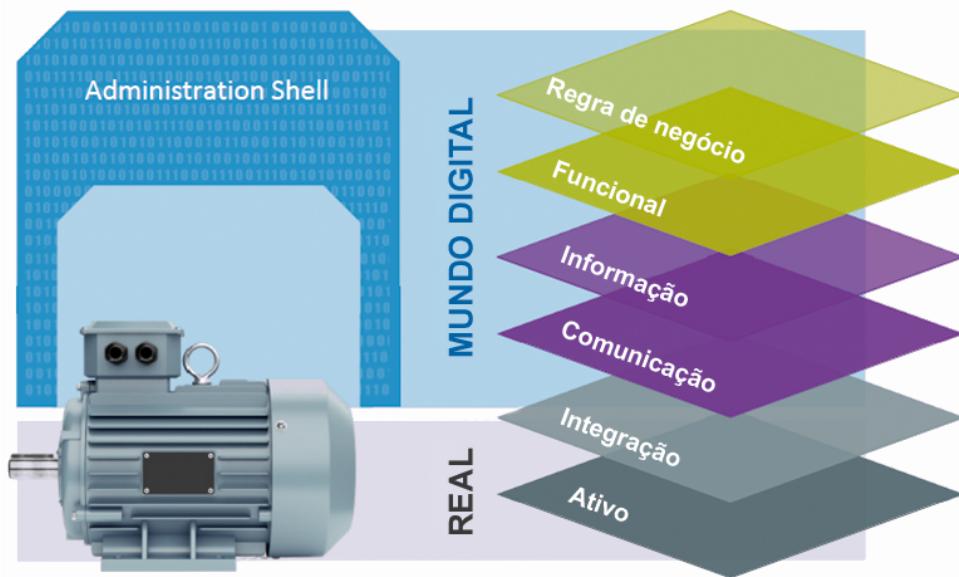


Figura 10 – Representação do AAS.

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

parceiros na CS e possuem um uso específico para um determinado ativo.

O AAS é um elo entre os ativos reais e seus correspondentes digitais no mundo conectado. Dentro da I4.0, os ativos possuem um AAS com capacidade de comunicação com outros dispositivos ([BADER et al., 2019b](#)). O conjunto Ativo-AAS é denominado “Componente I4.0” (C4.0).

A integração dos ativos, representada pelos C4.0, em um nível funcional requer uma descrição padronizada das funções (ou capacidades) dos ativos em questão. A padronização de submodelos para descrever detalhadamente cada função pode ser usada para definir requisitos para a fabricação de produtos ([BEDENBENDER et al., 2017](#)). A Figura 12 mostra um exemplo de detalhamento de funções de um ativo para o caso de diferentes tipos de processos de fabricação.

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

Desta forma, um C4.0 tem todas as informações para a efetiva interoperabilidade entre ativos no mundo conectado, inclusive os seus próprios requisitos, suas regras de negócio, limitações técnicas e todas as demais características que se relacionem ao ativo e sua interação com o ambiente.

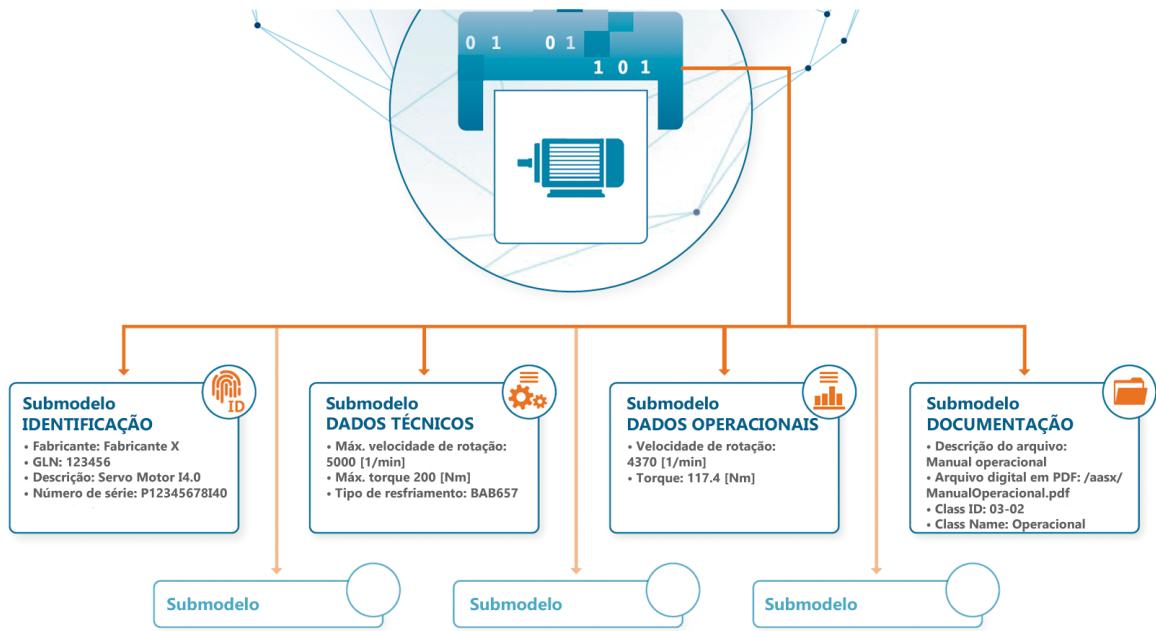


Figura 11 – Exemplificação de um AAS para um servomotor, incluindo os submodelos de identificação, dados técnicos, dados operacionais e documentação.

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

2.2 Logística & Cadeia de Suprimentos (CS)

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

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

O intercâmbio de informações é um tema chave da logística moderna. Este nicho é chamado de logística da informação e lida com o fluxo de informações entre humanos e/ou máquinas dentro ou entre organizações ([HAFTOR; KAJTAZI; MIRIJAMDOTTER, 2011](#)), que se agrupam formando uma rede de criação de valor por meio de informações. A Logística da Informação é intrinsecamente relacionada a processos de gestão da informação e tecnologias de informação.

A CS, por outro lado, é um conceito mais amplo. A CS é onde a logística é exercida. São as partes necessárias para dar suporte ao pedido de um cliente, desde o produtor

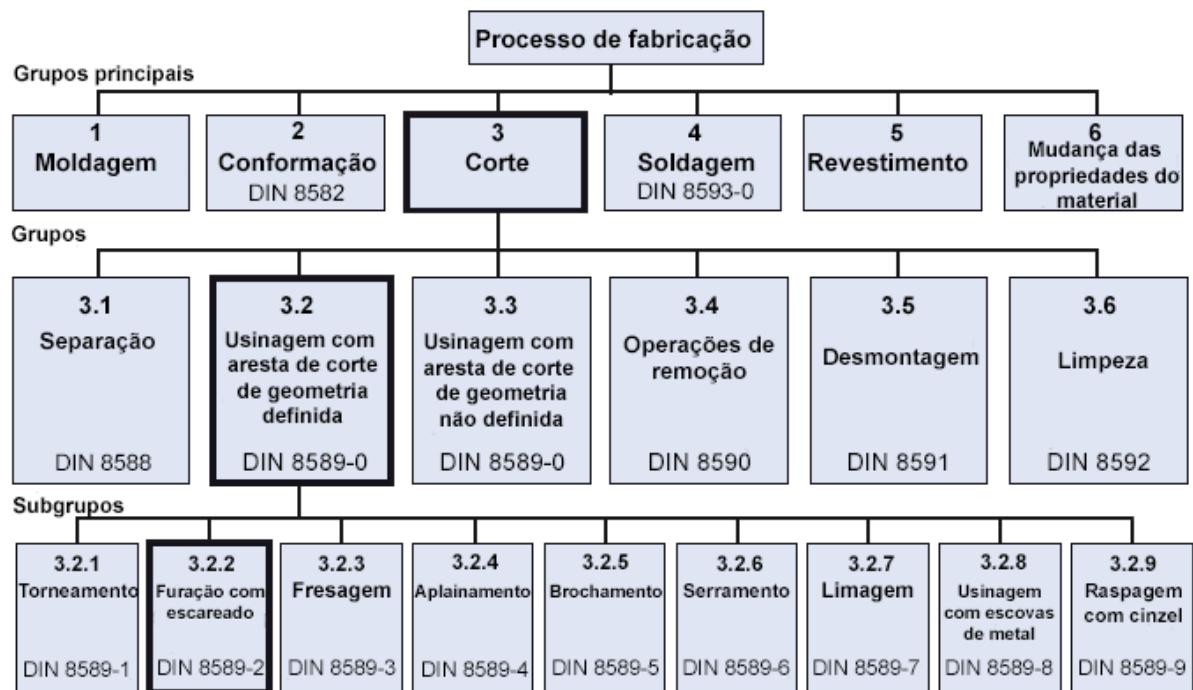


Figura 12 – Exemplo de processos de fabricação de um ativo (uma máquina) detalhados por meio de submodelos.

Fonte: [Bedenbender et al. \(2017\)](#) (adaptado).

até o consumidor final. A gestão da CS tem como alvo a orquestração de todas as partes envolvidas, criando assim uma logística integrada como forma de otimizar ao máximo o processo de fornecimento de um produto, serviço ou informação.

Uma CS simples envolve fornecedor, produtor e cliente ([HUGOS, 2018](#)), porém conceitos modernos estendem a noção de uma CS, passando a incluir diversos outros fornecedores de serviços em áreas como logística, finanças, *marketing* e desenvolvimento, que, mediante coordenação e colaboração, criam oportunidades para redução de custos e melhoria dos serviços fornecidos ao consumidor. A [Figura 13](#) exemplifica a inter-relação das partes em uma CS 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, pois sem uma comunicação adequada, gerentes podem tomar decisões supostamente racionais, porém que afetam negativamente outras partes 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 CS. 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 CS pode-se observar processos que agregam valor ao produto em

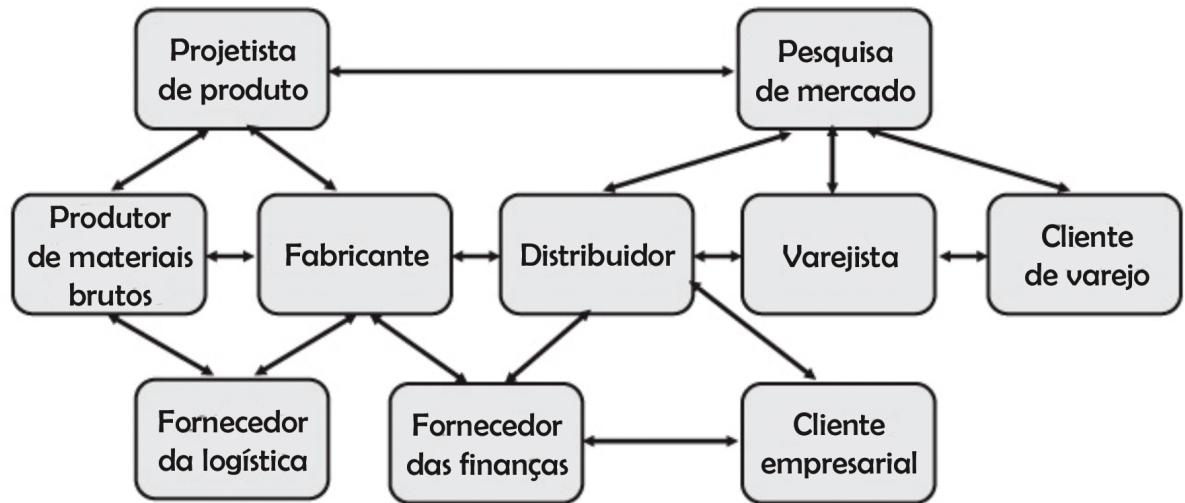


Figura 13 – Exemplo de CS estendida.

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

desenvolvimento. As etapas de transformação do produto com adição de valor ao longo da CS define o que se chama de Cadeia de Valor (CV).

Uma CV é um conjunto de atividades que empresas de um setor específico desempenham a fim de entregar um produto ou serviço que tenha algum valor perceptível para o mercado ([PORTER, 1985](#)). A ideia da CV é baseada na agregação de valor ao produto a cada processo de transformação ocorrido, processo esse que envolve a aquisição e consumo de recursos (mão de obra, materiais, equipamentos, instalações, administração, etc). As atividades em uma CV são divididas em duas categorias: as atividades primárias e as atividades de apoio ([PORTER, 1985](#)) (vide [Figura 14](#)).

As CV 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. 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.

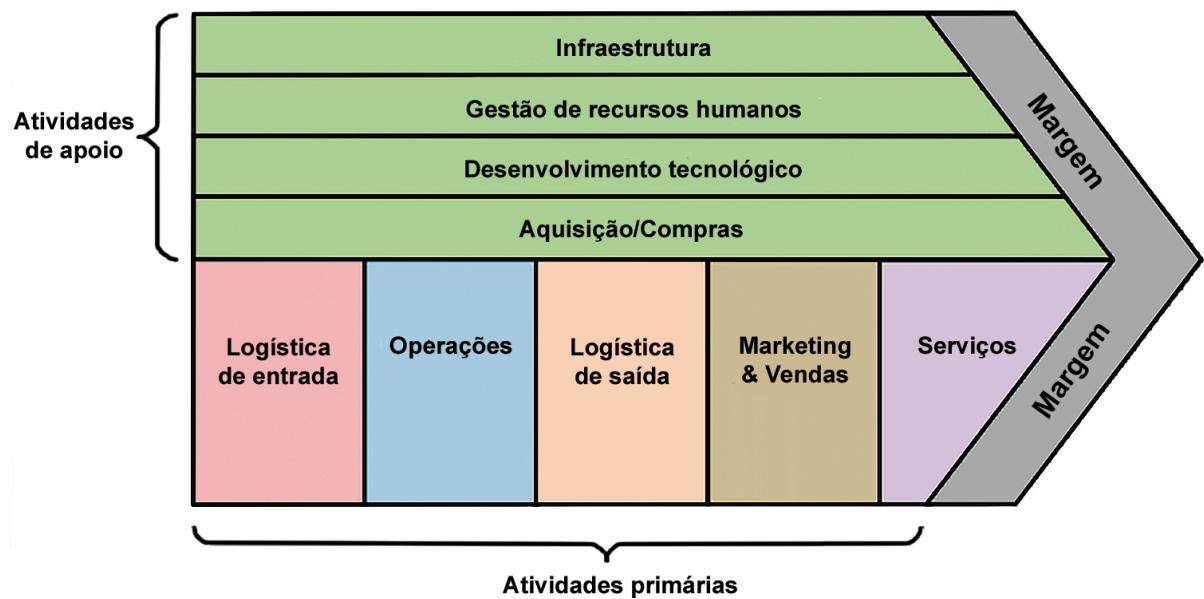


Figura 14 – Cadeia de valor de Porter.

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

2.2.1 Logística 4.0

Com o entusiasmo sobre o tema I4.0 surgido a partir de 2011, surgiram diversas linhas de pesquisa relacionadas. Uma dessas vertentes é relacionada aos novos desafios tecnológicos na logística e por vezes é denominada “Logística 4.0”. Estes novos desafios tecnológicos estão relacionados primariamente ao intenso uso das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) e de Internet das Coisas Industrial (IIoT) ([BARRETO; AMARAL; PEREIRA, 2017](#)).

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

As CS atuais podem ser extremamente grandes e complexas (alta interdependência entre as partes) e, portanto, sem uma correta gestão, podem levar à tomada de decisões não ótimas por parte dos gestores humanos. Por estes aspectos, as CS podem se aproveitar da nova forma de organização da I4.0 (ou da Logística 4.0), tornando os processos cada vez mais automatizados a fim de se atender os novos requisitos da sociedade moderna.

Dentro da CS, identificadores individuais podem ser usados a fim de se implementar a conectividade de objetos e informações requeridas no contexto da I4.0. Neste sentido, a tecnologia de RFID (*Radio-Frequency IDentification*) permite criar uma identificação única para um ativo. A utilização de identificadores individuais é comum para aplicação

de conceitos da I4.0 (ALYAHYA; WANG; BENNETT, 2016; VLACHOS, 2014; FAN et al., 2015; BIBI et al., 2017), pois permite a identificação de cada ativo na rede e possibilita a troca autônoma de informações.

A eficiente troca de informações ao longo da CS é uma das variáveis que influenciam na eficiência da cadeia (BARRETO; AMARAL; PEREIRA, 2017), especialmente em CS complexas e com alta interdependência entre as partes. O estudo sobre formas e processos visando a eficiência da troca de informações é um tema relevante dentro da Logística 4.0 e também foco de estudo neste trabalho.

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

2.3 Ciclo de vida do produto

Dentro da I4.0, os ativos dizem respeito a equipamentos, produtos, máquinas, peças, pessoas e quaisquer outros elementos envolvidos no ambiente industrial. Neste trabalho são abordados os ativos que se deslocam pela CS, isto é, os produtos. Estes produtos, conforme são fabricados e deslocam por cada elo da cadeia, produzem informações sobre logística, operações, fabricação, etc. Pode-se dizer que estas informações são geradas e compartilhadas ao longo de sua existência, ou seja, ao longo de seu ciclo de vida. Nesta seção são abordados os tipos específicos de ativo que são os produtos.

O conceito de ciclo de vida do produto foi elaborado em meados da década de 1960 com o propósito de criar um modelo que fosse capaz de explicar o sucesso ou fracasso de um produto introduzido no mercado, sendo capaz também de identificar momentos certos para modificar estratégias de preço, fabricação e quando o produto deve ser descontinuado (CAO; FOLAN, 2012). O modelo inicialmente desenvolvido por Levitt (1965) mostra o padrão de produtos na história passando por quatro estágios bem definidos: desenvolvimento de mercado, crescimento, maturidade e declínio, conforme observado na [Figura 15](#).

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*. Alguns estudos (CAO; FOLAN, 2012) envolvendo ciclo de vida 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.

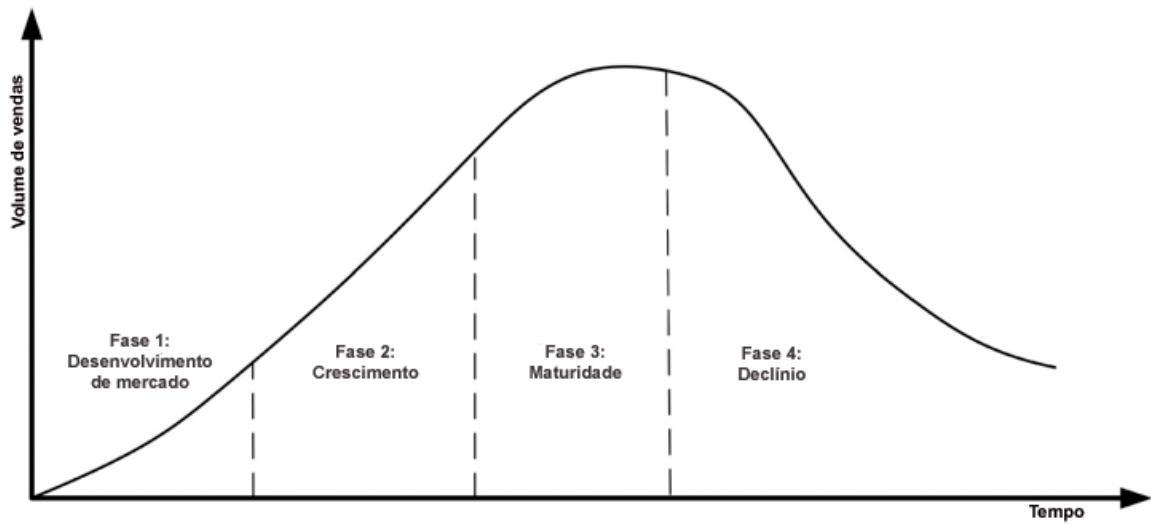


Figura 15 – Estágios do ciclo de vida do produto.

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

A [Figura 16](#) 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.

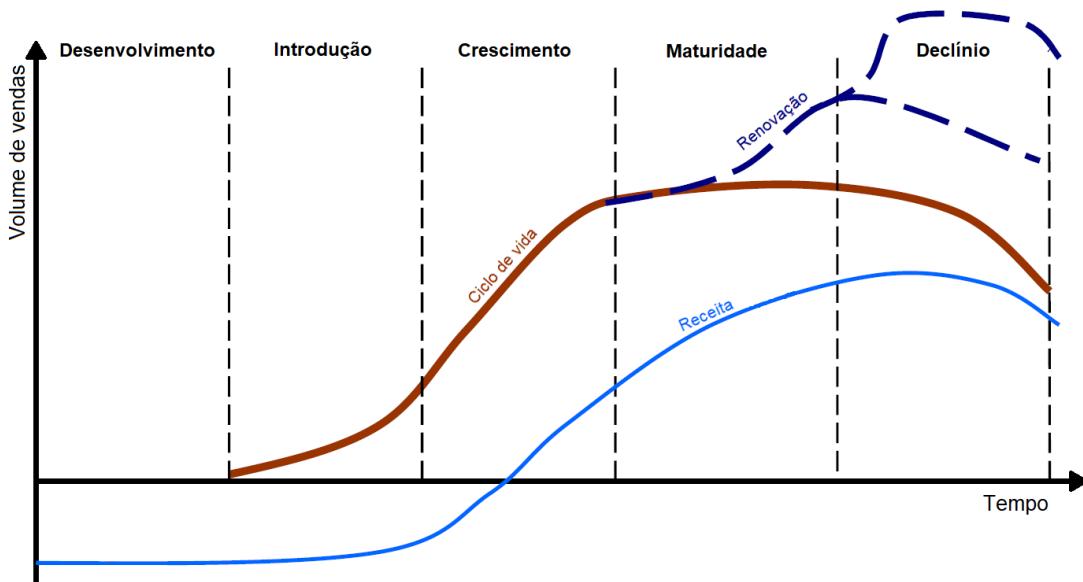


Figura 16 – Modelo de ciclo de vida do produto com renovação do produto.

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

A gestão do ciclo de vida do produto (GCVP) refere-se ao gerenciamento de um ativo ao longo dos estágios típicos de sua vida útil (vide [Figura 15](#)). Esta gestão dentro dos estágios mencionados pode se referir, por exemplo, à fabricação, comercialização, uso ou qualquer outra fase do ciclo de vida em que o produto se encontra.

A GCVP tem como finalidade auxiliar gestores na tomada de decisões de negócios por meio de estratégias como políticas de preços, expansão de mercado, retirada do produto ou inserção de novas versões, etc. A função da GCVP não é gerenciar apenas um produto, mas gerenciar de maneira integrada todas as partes, assim como o portfólio de produtos da empresa ([STARK, 2015](#)).

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

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

2.4 Memória digital do produto (MDP)

O termo 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.

Em outras referências, este conceito se relaciona a sistemas que permitem a coleta de dados em todas as fases do ciclo de vida do produto para a distribuição e/ou análise ([BRANDHERM; KRONER, 2011; BLUME et al., 2014](#)). Os dados de interesse do produto são heterogêneos e podem ser gerados e/ou consumidos por diferentes elos ao longo de sua CS. A [Figura 17](#) ilustra este comportamento.

Sua relevância está no fato da tendência de produtos novos apresentarem ciclos de vida cada vez mais curtos, e também devido ao fato das CS serem compostas por redes cada vez mais complexas, com múltiplos fornecedores e clientes. Com isso, a MDP manteria registros digitais dos produtos, permitiria o monitoramento de seu estado atual e o rastreamento de sua posição dentro do processo produtivo. 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.

O conceito de MDP pode ser introduzido nos produtos no cenário de I4.0 e por meio dela extrair e armazenar informações relevantes de eventos ocorridos ao longo do

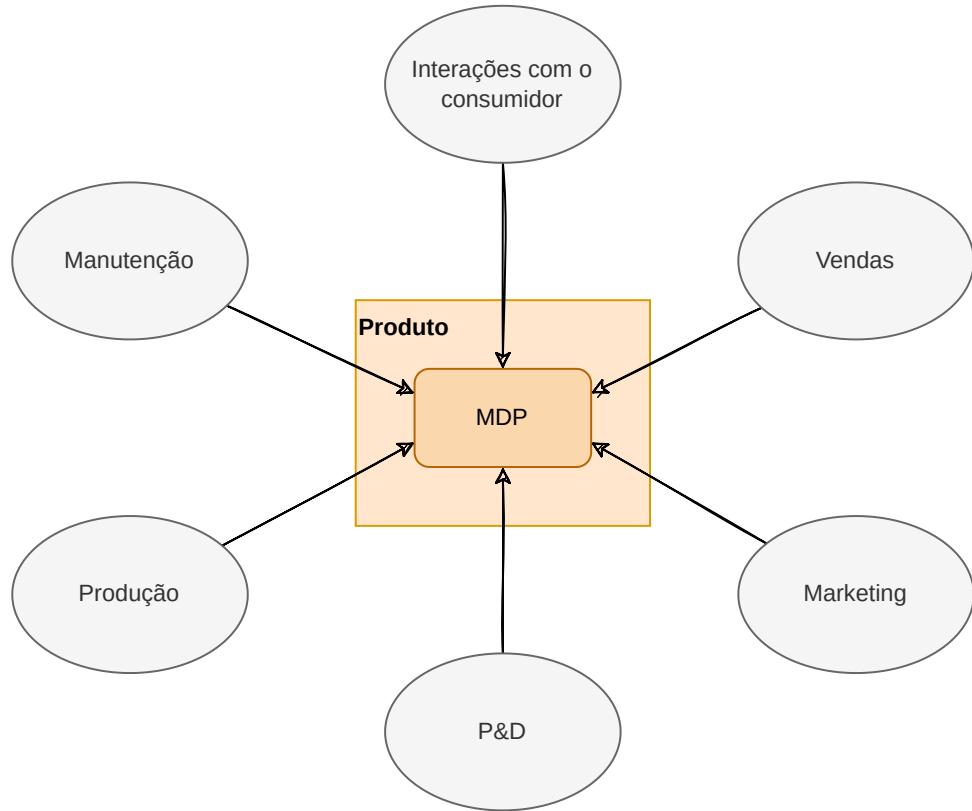


Figura 17 – Coleta de dados do produto ao longo da CS.

ciclo de vida do produto a fim de fornecer serviços a todo o ambiente com o qual o produto se relaciona (BRANDHERM; KRONER, 2011). A MDP fornece também uma forma de rastreabilidade, uma vez que pode armazenar informações geoespaciais do ativo ao longo do tempo.

Implementações de uma memória com informações sobre o produto ao longo de sua CS é importante, pois torna possível acessar e utilizar informações do mundo real provenientes de diferentes fontes para o potencial benefício das partes interessadas naquele produto (BRANDHERM; KRONER, 2011), como, por exemplo, fabricantes, transportadores, varejistas e consumidores. Ela também é relevante no pós-venda, onde a MDP continua a ser disponibilizada e ativa, dando a possibilidade ao consumidor de ainda manter contato com cada elo da CS e se beneficiar de serviços individuais que se acumulam na memória (BRANDHERM; KRONER, 2011).

2.5 Arquitetura orientada a serviços (SOA)

Arquitetura Orientada a Serviços (*Service Oriented Architecture - SOA*) é uma forma de conceber e implementar um sistema em que serviços são disponibilizados a outros sistemas por meio de um protocolo de comunicação comum em uma rede de computadores (BELL, 2008). Um serviço é uma unidade de funcionalidade que pode ser

fornecida/acessada remotamente. A SOA se destina a ser independente de fornecedores, produtos e tecnologias.

Para quem consome um serviço, a abordagem é como uma caixa preta, o que significa que o consumidor não sabe ou não precisa estar ciente do funcionamento interno deste serviço, sendo relevante apenas as interfaces de entrada e saída, definidas em um documento de contrato, acordado pelo fornecedor e pelo consumidor do serviço. Os serviços representam uma lógica de fornecimento de resultados. É uma abstração de problemas, ou seja, toda a complexidade interna inerente aos serviços pode ser abstraída pelos consumidores dos serviços.

SOA é uma abordagem que traz novas perspectivas uma vez que se estabelece um conjunto de princípios para a construção de um sistema autônomo e interoperável (CÂNDIDO et al., 2009). SOA tem por objetivo aumentar a eficiência, agilidade e produtividade de um sistema por meio da adoção generalizada do conceito de serviços (SOUT, 2013). Dentro do mundo da I4.0 e de sistemas produtivos estes princípios também podem ser aplicados.

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

A SOA dentro do meio industrial pode ser implementada por meio de um *middleware*, que é um *software* que integra os diferentes aplicativos em um sistema. A Figura 18 ilustra como se dá a interconexão entre ativos em um sistema (a) sem e (b) com um *middleware*.

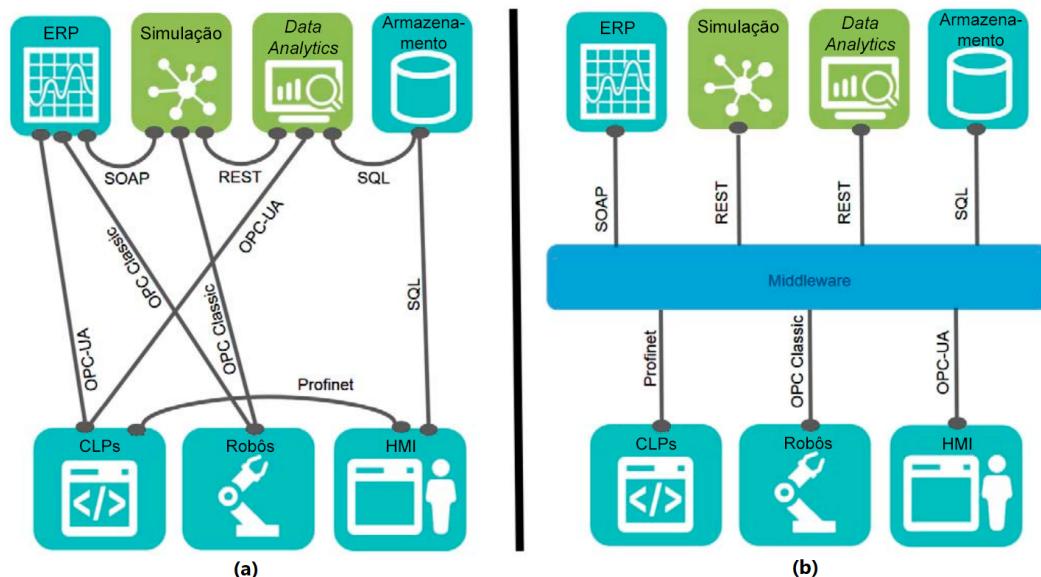


Figura 18 – Comunicação entre ativos em um sistema (a) sem *middleware* e (b) com *middleware*.

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

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

Para se disponibilizar um serviço por meio de uma API, o conceito de *Web Services* (WS) é vastamente utilizado ([SOUT, 2013](#)), pois assim é possível fornecer serviços utilizando a Internet (protocolos TCP/IP) como meio de tráfego de informações.

2.5.1 Web Services (WS)

Um WS é uma interface que descreve uma série de operações acessíveis por meio de uma linguagem de descrição de serviços padronizada ([GOTTSCHALK et al., 2002](#)). Um WS executa uma tarefa específica ou um conjunto de tarefas e retorna ao usuário o resultado da operação. Cada aplicação servidora de serviços pode ter a sua própria linguagem, que é traduzida para uma linguagem de transferência comum, como o XML (*Extensible Markup Language*), JSON (*JavaScript Object Notation*) e outros.

Por meio de WS, as aplicações podem ser descritas, publicadas, localizadas e invocadas em uma rede de comunicação tipo WWW (*World Wide Web*) ([SOUT, 2013](#)). Para que os WS sejam fornecidos e consumidos, é necessária uma interface de comunicação entre as duas partes. Em sistemas automatizados esta interface é uma API (*Application Programming Interface*), pela qual sistemas programáveis podem se comunicar. Um padrão de API comumente utilizado é a API REST, que é detalhada na [subseção 2.5.2](#).

O WS envolve três atores básicos: o provedor de serviços, o repositório de serviços e o solicitante de serviços; e por três operações básicas: a publicação, a procura e a interação ([GOTTSCHALK et al., 2002](#)). A [Figura 19](#) ilustra os atores e a interação entre eles por meio das operações.

Detalhadamente, os atores em um WS são:

- **Provedor de serviços:** Entidade que hospeda e fornece um determinado serviço. Esta entidade 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 ao solicitante;
- **Repositório de serviços:** Entidade que armazena e fornece 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:** Entidade que requer um determinado serviço e solicita a sua execução. O solicitante de serviço pode ser uma pessoa acessando pelo navegador ou uma outra aplicação realizando solicitações por meio de APIs.

Já as operações básicas em WS são:

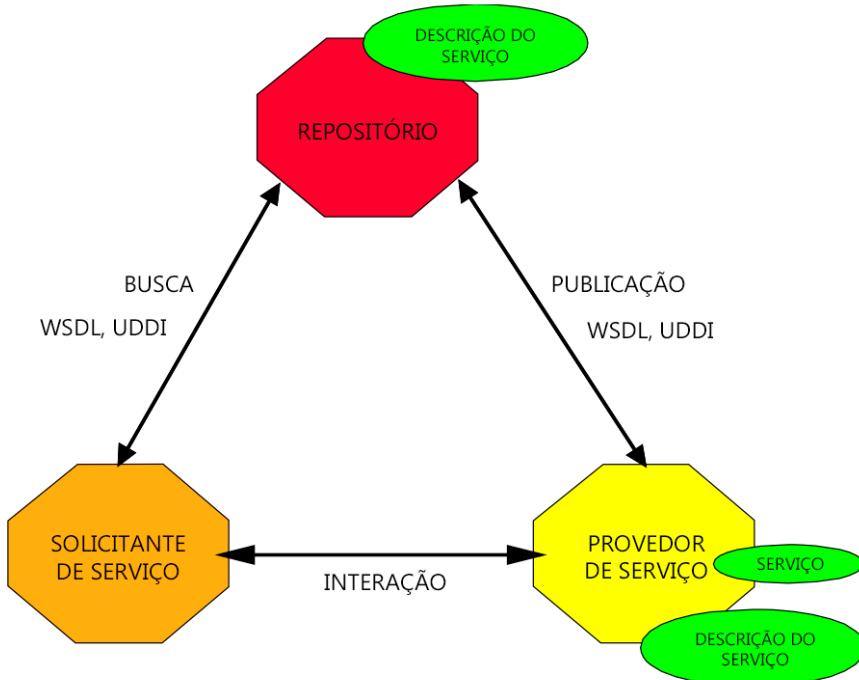


Figura 19 – Componentes de um WS e operações.

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

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

As etapas de interação entre as entidades (cliente e servidor) são representadas por meio do diagrama da [Figura 20](#).

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

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

Já a semântica de um WS é o documento que determina o comportamento esperado de resposta deste serviço, pode ser explícito ou implícito, oral ou escrito, processável por

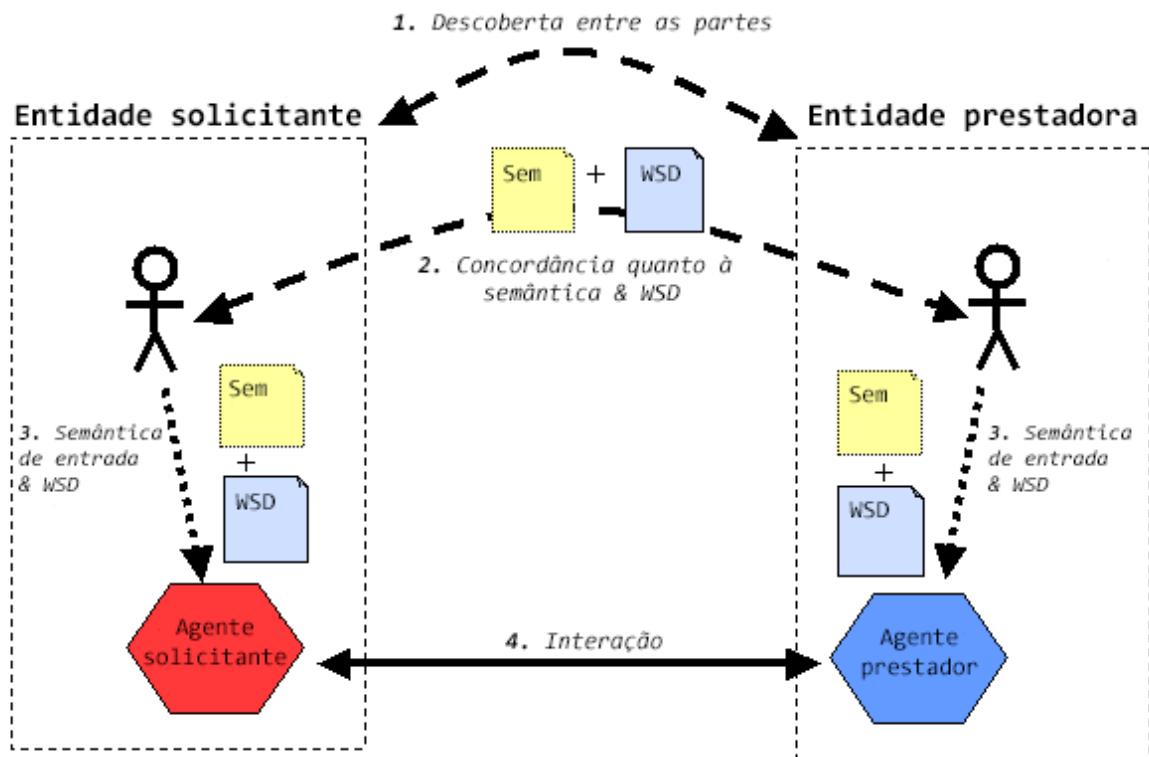


Figura 20 – Diagrama com os atores e interações em um WS.

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

máquina ou orientado a humanos, e pode ser um acordo legal ou um acordo informal ([BOOTH et al., 2004](#)).

Os WSs se tornaram atrativos, pois podem ser implementados com as tecnologias HTTP e XML, que estão disponíveis na maioria dos navegadores de internet e possuem suporte nativo em diversas linguagens de programação. A disponibilização de serviços interativos na *Internet* se tornou popular e com isso surgem novos modelos de negócios como o SaaS (*Software as a Service*), PaaS (*Platform as a Service*), IaaS (*Infrastructure as a Service*) e até mesmo MaaS (*Manufacturing as a Service*) ([ANNUNZIATA, 2019](#); [NICHOLS, 2019](#); [SIEPEN, 2019](#)).

Dentro da I4.0 não é diferente. O [Capítulo 4](#) descreve como os ativos podem publicar suas funcionalidades em repositórios e executarem determinadas tarefas mediante solicitação por parte do consumidor.

2.5.2 Transferência Representacional de Estado (REST)

A Transferência Representacional de Estado (*Representational State Transfer - REST*) define padrões para acesso e disponibilização de WSs. Os WSs que seguem o padrão REST são denominados *RESTful Services* ([FIELDING, 2000](#)).

O REST possibilita a interoperabilidade entre sistemas na *Internet*, pois permite que os sistemas solicitantes acessem e manipulem representações textuais de recursos usando um conjunto uniforme e predefinido de operações (BOOTH et al., 2004).

O REST veio gradualmente substituindo o padrão SOAP (*Simple Object Access Protocol*). Hoje, REST é comumente utilizado para o compartilhamento de informações em novos WSs, sendo o padrão SOAP usado em sistemas legado (SERRANO; HERNANTES; GALLARDO, 2014). Apesar de ambos os padrões serem baseados no HTTP e HTTPS, o REST geralmente contém um *payload* de mensagem mais leve por tratar dados no formato JSON (*JavaScript Object Notation*), ao contrário do padrão SOAP que utiliza o formato XML (*eXtensible Markup Language*).

O REST estabelece as orientações e boas práticas de uma interface que devem ser satisfeitas para que possa ser referida como um serviço *RESTful*. Esses princípios são (FIELDING, 2000):

1. **Cliente-Servidor:** segregação das interfaces dos usuários das interfaces do banco de dados. Desta forma, padroniza-se a interface para a interação com um banco de dados, trazendo mais portabilidade e flexibilidade aos sistemas e melhorando a sua escalabilidade;
2. **Sem estado:** um estado é o conjunto de dados salvos no servidor durante uma interação entre dois sistemas. Portanto uma interação sem estado significa que para o servidor cada nova mensagem é equivalente a uma interação com um cliente novo, uma vez que não há informações salvas sobre as interações anteriores. Com isso, cada solicitação do cliente ao servidor deve conter todas as informações necessárias para o servidor processar a solicitação. Desta forma, a solicitação não pode depender de qualquer tipo de contexto a ser armazenado no servidor, o estado da sessão é mantido inteiramente no cliente;
3. **Cache:** respostas para as solicitações podem ser armazenadas em memória (*cache*). Quando a resposta puder ser armazenada em *cache*, o cliente poderá reutilizar a resposta já recebida anteriormente e evitar de se realizar uma nova requisição;
4. **Interface uniforme:** As interfaces são padronizadas entre os sistemas que se comunicam por meio de um serviço REST. São definidas para os serviços REST quatro restrições de interface: identificação de recursos, manipulação de recursos por meio de representações; mensagens auto descritivas e hipermídia como forma de interação com a aplicação;
5. **Sistema em camadas:** o sistema é organizado em camadas hierárquicas, restringindo, assim, o comportamento do componente de forma que cada componente possa ter acesso somente às camadas imediatas (acima ou abaixo) com as quais está interagindo;

O principal item de manipulação relacionado a um serviço REST é o recurso. Um recurso é qualquer informação a ser manipulada: documento, imagem, uma coleção de objetos, etc. Os serviços REST utilizam um identificador único de um recurso como forma de referência em consultas. Já as coleções são conjuntos de recursos de uma mesma categoria, como por exemplo uma lista de usuários cadastrados, a lista de comentários em uma publicação, etc.

Cada método do protocolo HTTP está relacionado a um tipo de operação no REST. A [Tabela 3](#) mostra as possíveis operações e seus métodos HTTP correspondentes.

Tabela 3 – Mapeamento dos métodos HTTP em um serviço *RESTful*.

Método HTTP	Escopo	Semântica
GET	Coleção	Retorna uma coleção com todos os recursos.
GET	Recurso	Retorna um único recurso.
POST	Coleção	Cria um novo recurso em uma coleção.
PUT	Recurso	Atualiza um recurso completamente.
PATCH	Recurso	Atualiza um recurso parcialmente.
DELETE	Recurso	Exclui um recurso da base de dados.
OPTIONS	Recurso	Retorna os métodos HTTP disponíveis e outras opções.

Fonte: [Fielding \(2000\)](#) (adaptado).

Tanto para APIs REST quanto para APIs SOAP, é necessária a definição de um contrato, que é a documentação da API. Este documento descreve o comportamento esperado da API, o que inclui as URLs dos *endpoints* (rotas), os métodos de cada rota, argumentos e exemplos de chamadas (*requests*) com suas respectivas respostas ([SANTOS et al., 2020b](#)). O contrato garante ao cliente que o servidor responderá em um formato específico, evitando erros e exceções no cliente por quebra de esquema.

Existem vários formatos de arquivo que permitem criar um contrato e obter sua documentação. O mais comumente utilizado para a documentação de APIs REST é o OpenAPI ([SANTOS et al., 2020a](#)), anteriormente conhecido como *Swagger*.

Para APIs SOAP, o WSDL (*Web Service Description Language*) é utilizado como contrato ([BOOTH et al., 2004](#)). APIs com outros protocolos de comunicação, como por exemplo o gRPC (*Google Remote Call Procedure*), suportam o contrato por meio de arquivos protobuf (*protocol buffers*).

O contrato é definido pelos provedores do serviço e destinado aos consumidores

da API, ou seja, às empresas e desenvolvedores que irão utilizar a API. O documento geralmente é criado pela própria equipe de desenvolvimento que elabora o serviço.

2.6 Modelagem de sistemas

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

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

As técnicas de modelagem e análise de sistemas na CS são meios de promover a sua melhoria como um todo. A utilização destas técnicas auxiliam no entendimento sobre o comportamento do sistema e dos relacionamentos entre suas partes. Auxiliam também na reprodução e análise de diferentes cenários e soluções, na previsibilidade de possíveis perturbações de mercado e na melhoria nos processos de distribuição.

Com a intensificação da globalização é cada vez mais comum a criação de CS complexas, envolvendo várias organizações dispersas geograficamente. Por isso, as ferramentas de suporte à tomada de decisões são utilizadas para auxiliar no sentido de fornecer soluções mais adequadas à dinâmica de diversas CS. A modelagem e análise auxiliam na tomada de decisões e são úteis no entendimento das interações da CS e sobre como melhorar o seu desempenho (OLIVEIRA; LIMA; MONTEVECHI, 2016).

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

Miyagi (1996) define os sistemas feitos pelo homem (*man-made systems*), como sistemas de manufatura, transporte, comunicação, redes de computadores, etc. Estes sistemas são caracterizados por uma dinâmica decorrente da ocorrência de eventos que geram a alteração discreta de estados e, portanto, são classificados como Sistemas a Eventos Discretos (SED). Um SED é uma classificação de sistemas de acordo com seu comportamento, determinado pela ocorrência de eventos que alteram de forma discreta e instantânea o estado do sistema.

Para a modelagem de SEDs, a aplicação de ferramentas como a Rede de Petri e suas variações como *Production Flow Schema* (PFS) são formas de auxílio no desenvolvimento

de sistemas de controle e automação.

A utilização da técnica de PFS no contexto da I4.0 auxilia no mapeamento das operações e interações entre as partes do sistema, uma vez que a dinâmica de interação pode ser classificada com um SED. Neste trabalho o PFS é utilizado a fim de se indicar as atividades relacionadas à CS de um produto e as mapear para as camadas do RAMI4.0.

2.6.1 Production Flow Schema (PFS)

O PFS é uma técnica indicada para nível conceitual de modelagem, análise e controle de SEDs (MIYAGI, 1996).

No PFS, são identificadas as atividades, que por sua vez podem incluir vários outros eventos e estados organizados hierarquicamente.

Por meio de modelos em PFS é possível especificar uma estrutura de processos assim como da arquitetura de um sistema, indicando as interações entre as partes desse sistema. Além disso, com o PFS, os fluxos e as atividades podem ser descritos de forma desacoplada de qualquer tecnologia necessária para a implementação do sistema (PISCHING et al., 2018a).

Qualquer processo produtivo representado em PFS apresentará os seguintes elementos estruturais:

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

A Figura 21 descreve os elementos do PFS e sua representação gráfica.



Figura 21 – Elementos do PFS.

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

A atividade corresponde à realização de certas unidades ou conjuntos de operações como, por exemplo, um processamento, uma montagem, desmontagem, etc. Os distribui-

dores correspondem aos lugares de entrada e saída de itens materiais como, por exemplo, um *buffer* de entrada ou saída de peças ou de itens relativos à informações. Já os arcos orientados indicam a direção dos fluxos e a relação entre os elementos do sistema.

Os arcos conectando a parte externa das atividades (conectados diretamente nos colchetes) indicam um fluxo principal (primário) (Figura 22a); já os arcos conectando a parte interna da atividade indicam um fluxo secundário (Figura 22b) (MIYAGI, 1996).

Um terceiro tipo de arco é usado para representar a interface direta entre atividades e é indicado por meio de um arco conectando diretamente a parte interna de duas atividades (Figura 22c). Este arco indicador de interação direta entre atividades é usado para modelar interações entre diferentes níveis, como operações de solicitação e resposta (PISCHING et al., 2018b).

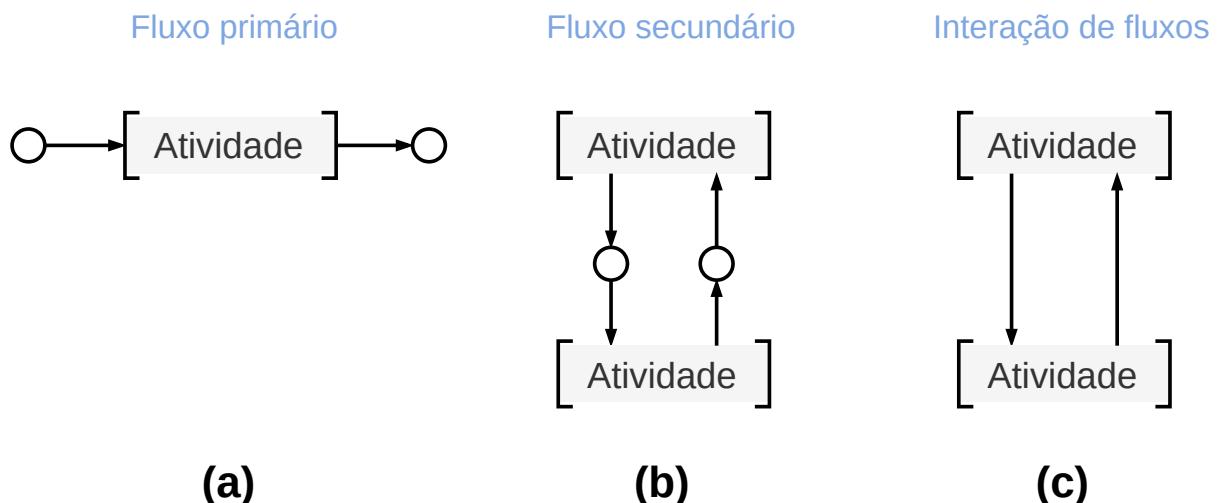


Figura 22 – Tipos de fluxo no PFS.

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

Os fluxos de processo do sistema em PFS são modelados por meio de uma abordagem *top-down*, assim os resultados podem ser refinados sucessivamente, detalhando, a cada iteração, a atividade representada. A modelagem do sistema em PFS, portanto, parte de um alto nível de abstração, seguido de sucessivos detalhamentos que resultam em modelos em rede de Petri e que por sua vez podem ser utilizados para a análise comportamental da dinâmica dos processos do sistema.

Desta forma, o PFS é uma linguagem de alto nível independente de tecnologia e de fabricantes para modelar os processos do sistema. A relevância de se adotar uma linguagem como o PFS para a representação de sistemas está na padronização da comunicação com especialistas de diferentes áreas, como arquitetos, engenheiros e desenhistas (PISCHING et al., 2018b). Assim, há uma efetiva comunicação sobre a interação entre as partes de um sistema e sobre os fluxos de itens materiais e/ou de informação em diferentes níveis.

do sistema em análise, como, por exemplo, produtos, ordens de serviço, comandos para máquinas, informações de sensores, etc.

3 Ciclo de vida do produto na I4.0

Este capítulo discute integração da Memória Digital do Produto (MDP) ao Componente 4.0 (C4.0) para que assim possa ser compartilhado pela Cadeia de Suprimentos (CS).

Além disso, são identificadas as informações do produto de interesse aos membros da CS para que possam ser agregadas em forma de submodelos de C4.0. A classificação das informações em submodelos é importante para a conformidade com o RAMI4.0.

Por fim, este capítulo faz um levantamento dos impactos em geração de valor com o compartilhamento da MDP por meio de serviços na I4.0.

Na I4.0 os ativos se apresentam em diversas formas. Entretanto, ao longo deste capítulo, os ativos tratados são os produtos, uma vez que este é o objeto que percorre a CS e gera informações.

3.1 Integração da MDP ao C4.0

O conceito de MDP é inserido na I4.0 com o objetivo de agregar valor ao produto por meio da possibilidade de acesso a suas informações por outros parceiros na CS.

Nesta seção são apresentados os detalhes da estruturação do *Asset Administration Shell* (AAS), que é parte de um C4.0, contendo todas as partes necessárias (incluindo a MDP) para a implementação do compartilhamento de informações por meio de WS.

A estruturação proposta é baseada em [Bader et al. \(2019b\)](#), na qual as funcionalidades dos ativos (no caso, os produtos) são agrupadas em forma de submodelos, que são unidades de agrupamento de propriedades semelhantes ([BADER et al., 2019b; ADOLPH et al., 2018; BEDENBENDER et al., 2017](#)). Os dados do ativo são armazenados nos próprios submodelos, enquanto a MDP permite a extração e gerenciamento do acesso às informações dos submodelos para que possam ser fornecidas ao solicitante por meio de WS.

A MDP no contexto de um C4.0 agraga as informações referentes a cada um dos submodelos e as organiza de forma que possam ser disponibilizadas.

Como a MDP é parte integral do AAS de cada C4.0, que representa a parte digital do ativo, esta pode estar em qualquer meio digital, inclusive em armazenamentos remotos em plataformas na nuvem. Estas plataformas específicas suportam o armazenamento de grandes quantidades de dados, assim como podem assegurar uma alta capacidade de processamento de requisições de serviços.

A estrutura do C4.0 com a MDP integrada é apresentada na [Figura 23](#).

Os dados estão contidos nos submodelos. Se considera que a MDP dispõe de uma interface para a leitura e escrita destes dados. A MDP representa, assim, um ponto único

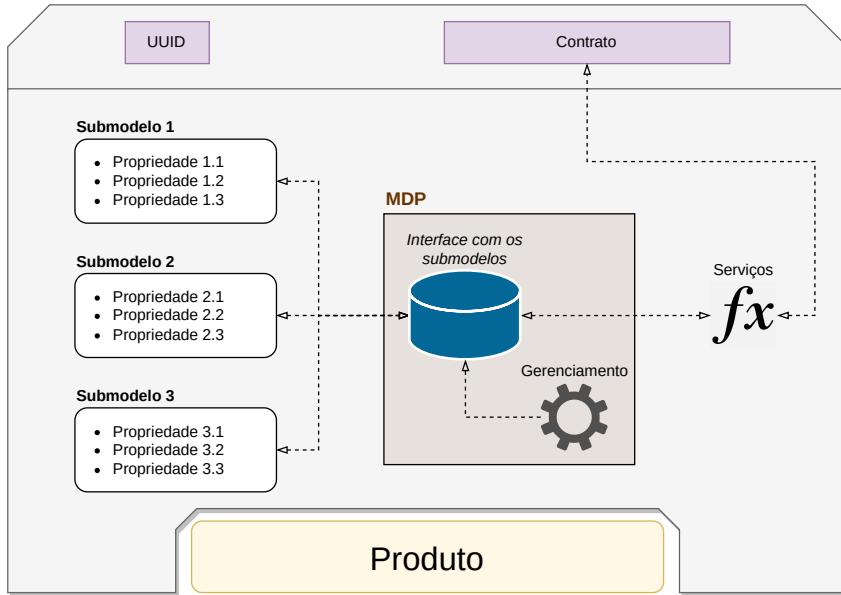


Figura 23 – Integração da MDP ao C4.0.

de extração de dados dos submodelos, evitando, desta forma, a leitura de dados não tratados.

Se considera também que a MDP é capaz de realizar o gerenciamento dos dados, atendendo, por exemplo, políticas de acesso e/ou escrita e demais regras de negócio do produto. Uma analogia é de que os submodelos representam o banco de dados, enquanto a MDP é a interface para as operações de criação, leitura, atualização e exclusão (operações CRUD - *Create, Read, Update, Delete*) nesta base de dados.

Neste trabalho é dado foco às informações sobre o ativo que sejam de interesse aos membros da CS e que possam ser lidos ou escritos por meio de WSs. Alguns exemplos deste tipo de informação podem incluir: a ficha técnica detalhada do ativo, submodelos de histórico de leitura de sensores, histórico de leitura de geolocalização (GPS), histórico de padrões de uso, etc.

3.2 Submodelos do C4.0-Produto

Nesta seção são apresentados os submodelos e propriedades necessários para um produto que percorre a CS. O ativo produto junto com o seu AAS representa o C4.0-Produto (ou C4.0-Servidor, por ser o servidor de informações). Os submodelos do C4.0-Produto devem ser padronizados e detalhados a fim de garantir a interoperabilidade entre os sistemas.

O produto é a fonte e o servidor de informações para os diversos membros da CS (ou seja, os demais C4.0). O acesso a estas informações permite a colaboração entre os membros e assim abre oportunidades para uma tomada de decisões coordenada visando a maior eficiência do sistema como um todo.

Para isto, é necessária uma definição dos submodelos para que se possa identificar os tipos de informações a serem compartilhadas e com quais membros compartilhar. Além disso, a definição destes submodelos contribui com o refinamento das especificações do AAS no contexto da I4.0.

[Torres e Vargas \(2014\)](#) em uma análise de literatura mostra o impacto do compartilhamento de informações e de diferentes estratégias de colaboração no desempenho de CSs. Eles classificam os trabalhos quanto ao tipo de informação a ser compartilhada, apresentando também a descrição de informações comumente mencionadas nos trabalhos.

Além disso, [Bader et al. \(2020\)](#) definem alguns submodelos padrões para a I4.0 e detalham suas respectivas propriedades.

Os tipos de informações identificados na análise bibliográfica de [Torres e Vargas \(2014\)](#) e no documento de [Bader et al. \(2020\)](#) serão incorporados a novos submodelos propostos para o produto para que possam ser compartilhados por meio da MDP ao longo da CS.

Os submodelos propostos são baseados na classificação das informações (propriedades) contidas em cada um deles. São eles: “Dados Gerais”, “Processos”, “Inventário”, “Pedido”, “Operação” e “Documentação”.

Além disso, os submodelos são classificados como “classe”, onde as informações estão relacionadas a um conjunto de instâncias de um produto de mesma classe/família, e/ou classificados como “unitário”, onde a informação é relativa a uma instância específica do produto. A [Figura 24](#) mostra os submodelos propostos e suas classificações.

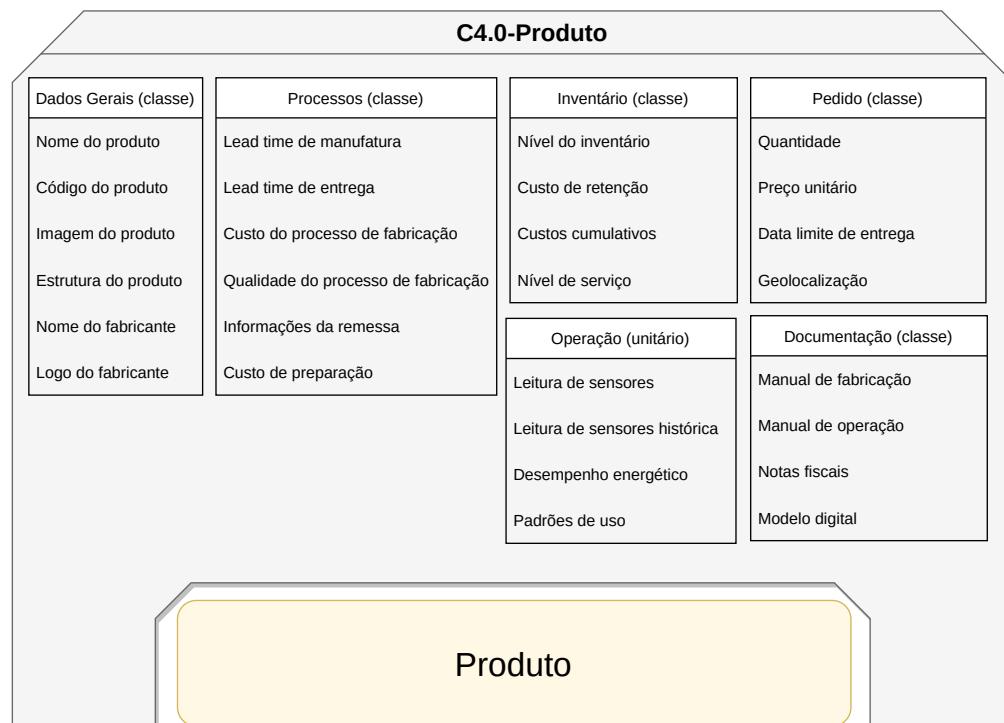


Figura 24 – Submodelos do C4.0-Produto e suas propriedades.

3.2.1 Submodelo “Dados Gerais”

O C4.0-Produto deve conter um submodelo que represente as informações gerais relacionadas ao produto que são de acesso público.

O submodelo “Dados Gerais” é baseado no *template* de submodelo “*Nameplate*” (Placa de Identificação) introduzido por [Bader et al. \(2020\)](#), que tem como alvo principal equipamentos para indústria de processos e automação industrial.

As informações neste submodelo descrevem como as características do produto estarão visíveis para os membros da CS.

Dentro deste submodelo, todas as propriedades são comuns a uma mesma classe de produtos.

A [Tabela 4](#) detalha o submodelo “Dados Gerais” com suas respectivas propriedades.

Tabela 4 – Propriedades do submodelo “Dados Gerais”.

Propriedade	Tipo	Descrição
Nome do produto	<i>String</i>	Título que constitui a denominação comercial do objeto/produto.
Código do produto	<i>String</i>	Conjunto de números e/ou letras para identificação do modelo do produto.
Imagen do produto	<i>Image</i>	Arquivo de imagem do produto em um formato de imagem comum (BADER et al., 2020).
Nome do fabricante	<i>String</i>	Designação legalmente válida do órgão natural ou judicial diretamente responsável pela concepção, produção, embalagem e rotulagem de um produto (BADER et al., 2020).
Logo do fabricante	<i>Image</i>	Arquivo de imagem da logo do fabricante em um formato de imagem comum (BADER et al., 2020).

3.2.2 Submodelo “Processos”

O submodelo “Processos” do C4.0-Produto descreve informações relacionadas a processos de negócio aplicados ao produto a fim de satisfazer as demandas do consumidor final, como as etapas de pedido, produção e envio.

A etapa de pedido começa quando um comprador faz um pedido ao fornecedor e termina quando o fornecedor aceita o pedido. A etapa de produção ocorre com a

transformação dos materiais de entrada em um produto de maior valor. A etapa de envio entrega as mercadorias do fornecedor ao comprador. Diferentes tipos de informações estão relacionados a cada uma destas etapas.

Dentro deste submodelo, todas as propriedades são comuns a uma mesma classe de produtos.

A [Tabela 5](#) detalha o submodelo “Processos” com suas respectivas propriedades.

Tabela 5 – Propriedades do submodelo “Processos”.

Propriedade	Tipo	Descrição
Tipo de processo de fabricação	<i>Double</i>	Tipo de processo de fabricação utilizado. Dado que diferentes empresas podem produzir um produto utilizando processos de fabricação distintos, esta propriedade permite que o cliente possa selecionar/filtrar um fornecedor com base no processo desejado. Além disso, é utilizado para equiparar fornecedores que utilizam um mesmo processo de fabricação, não prejudicando assim um fornecedor que usa um processo mais caro, porém mais moderno.
Custo do processo de fabricação	<i>Double</i>	Custo total do processo de fabricação. O compartilhamento dos custos do processo é necessário no planejamento integrado da CS.
Qualidade do processo de fabricação	<i>Float</i>	Agregação de um conjunto de dados estatísticos relacionados à qualidade do processo produtivo de um fabricante. O compartilhamento de informações relacionadas à qualidade é importante para o estabelecimento de confiabilidade no processo de fabricação do produto. O tipo de métrica adotada para a determinação da qualidade varia dependendo do tipo de processo de fabricação e deve ser acordado entre as partes. Uma forma genérica para a determinação da qualidade é o termo “Q” do índice OEE (<i>Overall Equipment Effectiveness</i>) (CORRALES et al., 2020), que representa a razão entre peças não rejeitadas e o total de peças produzidas.

Propriedade	Tipo	Descrição
<i>Lead time</i> médio de manufatura	<i>Float</i>	O <i>lead time</i> médio de manufatura/fabricação é o período de tempo necessário para fabricar um item, incluindo o tempo de fila, tempo de preparação, tempo de execução, tempo de movimentação, tempo de inspeção e tempo de armazenamento. Esta informação é dinâmica e calculada com base no tempo histórico médio observado em pedidos passados.
Custo de <i>setup</i>	<i>Double</i>	O custo de preparação da produção (<i>setup</i>) é relacionado a todas as despesas necessárias para a preparação da máquina para a produção, incluindo a mão de obra diretamente aplicada na sua preparação. À medida que o tamanho do lote de pedidos aumenta, reduz-se o custo total da demanda uma vez que o custo de <i>setup</i> dilui-se no valor total.
Informações de entrega	<i>Map</i> <i><String></i>	Informações sobre transportadoras disponíveis para a realização da entrega do produto associadas ao custo unitário do serviço de cada uma. Informações de entrega variam conforme o destino final da entrega.
<i>Lead time</i> médio de entrega	<i>Map</i> <i><Float></i>	Tempo de entrega médio de um determinado produto. Esta informação também é dinâmica e calculada com base no tempo histórico médio observado em pedidos passados. Informações de entrega variam conforme o destino final da entrega.

3.2.3 Submodelo “Inventário”

O submodelo “Inventário” do C4.0-Produto agrega informações relacionadas ao gerenciamento do inventário de uma classe de produtos. O objetivo destas informações é a visibilidade do inventário de forma que seja possível ter um produto para venda no momento certo e ao mesmo tempo reduzir custos relativos a estoque.

Informações relacionadas ao inventário auxiliam na tomada de decisões sobre quando realizar pedidos ao fabricante, a quantidade de materiais a serem solicitados e onde armazenar.

As informações de inventário podem ser consumidas por sistemas automatizados

para orquestrar a linha de produção e manter os inventários em um nível otimizado, efetuando ordens de compra para outros fornecedores automaticamente. E, desta forma, balancear o *tradeoff* entre custo de estoque e custos de oportunidade de venda.

A Tabela 6 detalha o submodelo “Inventário” com suas respectivas propriedades.

Tabela 6 – Propriedades do submodelo “Inventário”.

Propriedade	Tipo	Descrição
Nível do inventário	<i>Integer</i>	Quantidade atual de itens de uma determinada classe de produtos em estoque.
Custo de retenção	<i>Double</i>	Custo decorrente da manutenção em estoque de unidades de uma determinada classe de produtos.
Custos cumulativos	<i>Double</i>	Custo cumulativo total decorrente da manutenção de itens excedentes de uma classe de produtos em estoque por um determinado período de tempo.
Nível de serviço	<i>Float</i>	Probabilidade esperada de não ocorrer falta de estoque para uma classe de produtos durante o próximo ciclo de reabastecimento e, portanto, a probabilidade de não perder vendas futuras.

3.2.4 Submodelo “Pedido”

Cada pedido contém informações sobre a demanda do consumidor e os pedidos entre os fornecedores que resultaram na movimentação do produto ao longo da CS. As informações do pedido incluem a quantidade de itens no pedido, data limite de entrega e tamanho do lote.

Compartilhar informações de quantidade de pedido entre as partes da CS ajuda na visibilidade do estado atual de um pedido por todos os membros.

Todas as propriedades deste submodelo se referem a uma classe de produtos e não a um produto unitário visto que um pedido pode estar associado a vários produtos em um único lote.

As informações de pedido são importantes para o planejamento da produção de todas as partes envolvidas na CS como forma de se evitar, por exemplo, o efeito chicote (LEE; PADMANABHAN; WHANG, 1997), que é um problema comum quando há falta de compartilhamento de informações de demandas em tempo real, causando a imprecisão na estimativa da demanda por parte de cada membro da CS quando ocorrem flutuações nos volumes dos pedidos.

A Tabela 7 detalha o submodelo “Pedido” com suas respectivas propriedades.

Tabela 7 – Propriedades do submodelo “Pedido”.

Propriedade	Tipo	Descrição
Quantidade	<i>Integer</i>	Quantidade de itens de um produto solicitado. Representa uma demanda de fabricação.
Preço do pedido	<i>Double</i>	Valor pago pela demanda solicitada.
Data limite de entrega	<i>Datetime</i>	Prazo limite para a entrega de um determinado pedido.
Geolocalização	<i>String</i>	Localização geográfica em tempo real de um determinado pedido.
Notas fiscais	<i>Blob</i>	Documento oficial que registra as vendas de produtos pela empresa. É referente ao lote vendido.

3.2.5 Submodelo “Operação”

Este submodelo do C4.0-Produto representa dados relacionados ao funcionamento do produto.

O produto nesta fase está em operação. Portanto, o seu funcionamento e a interação do produto com o usuário/operador gera dados de funcionamento.

A análise dos dados do produto sobre o desempenho em tempo real, juntamente com dados históricos ajudam a entender melhor os problemas de serviço e tentar prever problemas de manutenção dos produtos antes que estes aconteçam.

Desta forma, o fornecedor passa a ter acesso aos dados de funcionamento de um produto vendido, seja este um bem de consumo destinado ao consumidor final ou um equipamento/máquina destinado a outras plantas de produção, possibilitando assim a manutenção orientada por dados, atuais e históricos, de um produto em funcionamento.

Todas propriedades deste submodelo se referem a um produto unitário, pois têm relação direta com seus dados de operação.

A Tabela 8 detalha o submodelo “Operação” com suas respectivas propriedades.

Tabela 8 – Propriedades do submodelo “Operação”.

Propriedade	Tipo	Descrição
Leitura de sensores	<i>Map <Float></i>	Leitura em tempo real dos sensores de temperatura, vibração, etc.

Propriedade	Tipo	Descrição
Dados históricos de sensores	<i>Map</i> <i><Float></i>	Estrutura de dados para o armazenamento de leituras de sensores no passado.
Desempenho energético	<i>Map</i> <i><Float></i>	Armazenamento de índices de desempenho energético calculados com base nas leituras dos sensores do equipamento.
Padrões de uso	<i>Map</i> <i><String></i>	Informações relacionadas à interação do usuário/operador com o produto. É gerado com base nos padrões de uso do produto.

3.2.6 Submodelo “Documentação”

Este submodelo do C4.0-Produto é baseado em [Bedenbender et al. \(2017\)](#), que menciona a necessidade da existência de um submodelo destinado ao armazenamento de arquivos binários que não possuem um formato específico.

Este submodelo destina-se ao armazenamento e versionamento de documentos digitais relacionados ao produto. Tal documento pode ser um formato proprietário ou aberto como, por exemplo .pdf, .docx, .ppt, .dwg, .psd e outros.

Todas as propriedades deste submodelo são comuns a uma família de produtos.

A [Tabela 9](#) detalha o submodelo “Documentação” com suas respectivas propriedades.

Tabela 9 – Propriedades do submodelo “Documentação”.

Propriedade	Tipo	Descrição
Manual de fabricação	<i>Blob</i>	Descrição sobre todas as operações realizadas na produção envolvendo o produto, desde a calibração de equipamentos até a saúde dos colaboradores.
Manual de operação	<i>Blob</i>	Manual destinado ao usuário com instruções de operação/uso.
Modelo digital	<i>Blob</i>	Representação digital do produto com suas formas e dimensões.

3.3 Geração de valor por meio do compartilhamento da MDP

O histórico completo do ciclo de vida de um determinado produto corresponde a suas informações de estados geradas ao longo de sua existência. Estas informações são registradas e podem ser acessadas via MDP. As informações de um produto são coletadas tanto em sua fase “tipo” quanto em sua fase “instância”. Estas informações podem ser aproveitadas de forma inteligente para a geração de valor por meio de novos modelos de negócio.

O compartilhamento de informações entre estas duas fases do ativo auxilia na melhoria contínua do produto. A Figura 25 ilustra este cenário. Foram identificadas duas formas de geração de valor por meio das informações do ativo: as “melhorias de projeto” e as “melhorias operacionais”.

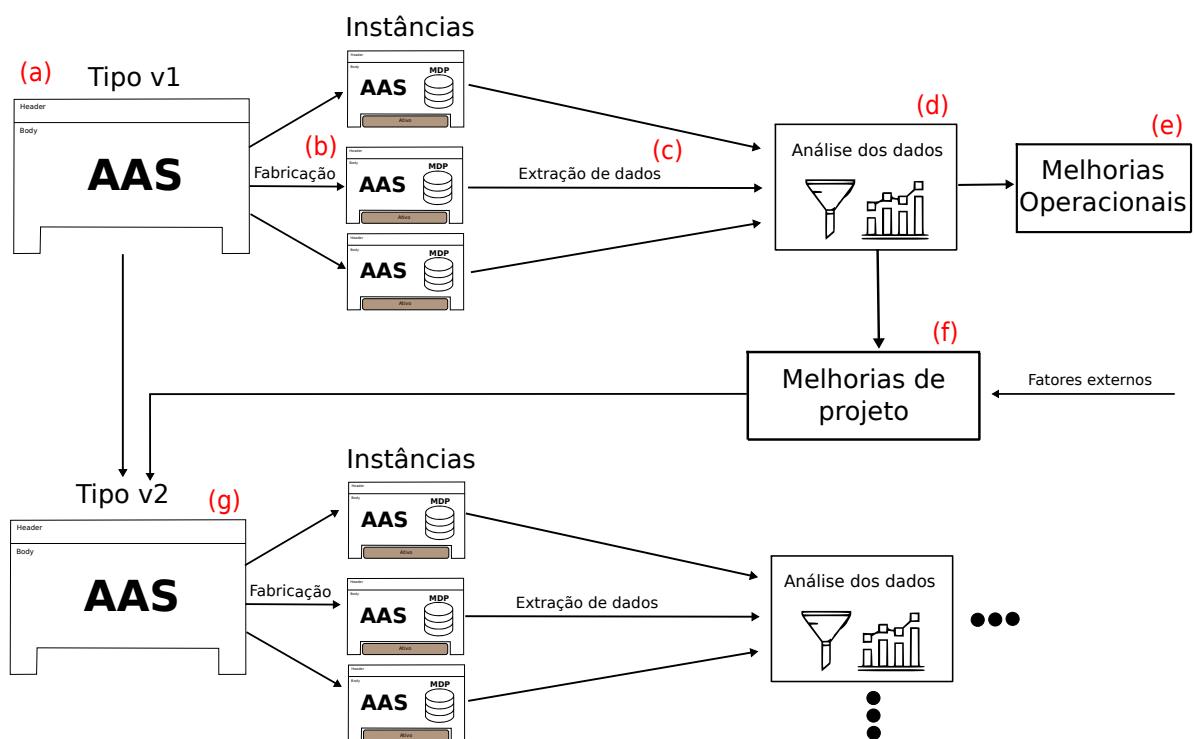


Figura 25 – Ciclo de vida do produto.

O fluxo de informações e geração de valor é detalhado a seguir:

- O projeto inicial de um produto é disponibilizado para produção em forma de um “tipo”;
- Instâncias do projeto são fabricadas e disponibilizadas para venda e distribuição;
- Dados são coletados a partir das várias instâncias produzidas;

- (d) Um alto volume de dados coletados das instâncias é analisado utilizando técnicas de análise de dados;
- (e) A partir do processamento dos dados, há criação de valor relacionada à melhoria operacional do produto (a ser detalhada na [subseção 3.3.1](#));
- (f) A partir do processamento dos dados e de outros fatores externos, há criação de valor relacionada à melhoria de projeto do produto (a ser detalhada na [subseção 3.3.2](#));
- (g) Com as melhorias de projeto, uma nova versão (tipo) é gerada, completando assim o ciclo de vida.

Os produtos podem gerar, por exemplo, informações sobre uso e manutenções realizadas, que podem ser armazenadas na MDP e assim auxiliar em melhorias no seu próprio processo de fabricação, além de ser fonte de dados para o desenvolvimento de novas versões.

O compartilhamento das informações insere um novo argumento na competitividade entre as empresas ([FRÄMLING et al., 2013](#)) e, por meio da MDP, este compartilhamento é possibilitado. Os novos ativos inseridos neste novo “formato” trazem a possibilidade de exploração de seus dados e alteram, desta forma, a estrutura da indústria e a natureza da concorrência, expondo as empresas a novas oportunidades e ameaças competitivas ([PORTER; HEPPELMANN, 2015](#)).

A MDP, portanto, traz a possibilidade de maior agregação de valor ao produto como um todo por meio do compartilhamento de informações. Nesse sentido, estão sendo aqui consideradas duas novas classificações quanto às formas de melhoria do produto e agregação de valor por meio da MDP com base nos submodelos apresentados na [seção 3.2](#): as **melhorias operacionais** ([subseção 3.3.1](#)) e as **melhorias de projeto** ([subseção 3.3.2](#)).

3.3.1 Melhoria operacional do produto

A análise de dados da MDP traz benefícios às “instâncias” sem necessariamente alterar seu projeto (alterar seu “tipo”). A partir das classificações sobre o valor das informações dos produtos apresentadas por [Porter e Heppelmann \(2015\)](#), foi feito um mapeamento para as funções relacionadas às melhorias operacionais, criando uma nova classificação das informações sob o contexto do eixo “ciclo de vida e cadeia de valor” do RAMI4.0.

O valor das informações no que diz respeito à melhoria operacional foram então reclassificados sob o contexto do RAMI4.0 levando em consideração os submodelos apresentados na [seção 3.2](#). As seguintes categorias foram definidas:

- Manutenção orientada por dados (submodelo “Operação”);
- Monitoramento e rastreamento em tempo real (submodelo “Pedido”);

- Integração dos membros da CS e eficiência logística (submodelos “Dados Gerais”, “Inventário”, “Pedido” e “Documentação”).

As categorias permitem segregar as informações de acordo com seus respectivos objetivos ao serem inseridos no projeto de um ativo.

A seguir são apresentadas as descrições de cada uma das categorias apresentadas:

A “**Manutenção orientada por dados**” (*data driven*) é uma mudança de paradigma em relação à forma tradicional de manutenção corretiva. Com a manutenção orientada por dados são usados o comportamento histórico do produto e técnicas estatísticas para a criação de modelos que apontem eventuais falhas antes que estas venham a acontecer.

Com o histórico de leitura de sensores de cada item do ativo, estratégias de manutenção preditivas e prescritivas podem ser adotadas pelo próprio fabricante. A manutenção orientada pelos dados de uso, comparada com a manutenção tradicional, pode reduzir a incidência de falhas e trazer benefícios econômicos.

Com a manutenção prescritiva, os dados empíricos e o histórico do ativo são utilizados para prescrever qual medida deve ser tomada, trazendo mais confiabilidade de operação ao ativo. A contínua extração de dados de sensores do ativo e sua análise torna a ação de manutenção mais automatizada.

A manutenção dos ativos orientada por dados permite trazer a responsabilidade de manutenção dos ativos de uma planta para a instituição que melhor conhece os detalhes do funcionamento técnico do ativo, como o fabricante ou uma empresa especializada na manutenção de um determinado ativo. O uso de dados para a manutenção permite implementar um novo paradigma de detecção e correção de falhas de equipamentos industriais: a Manutenção como um Serviço (*Maintenance-as-a-Service - MaaS*) (ZOLL; JÄCK; VOGT, 2018).

O “**Monitoramento e rastreamento em tempo real**” de produtos é possibilitado pela leitura de coordenadas geográficas. O monitoramento e rastreamento são úteis durante o transporte de produtos entre os membros da CS. O distribuidor, por exemplo, pode ter acesso à posição exata de um ativo enquanto este estiver sob sua custódia.

A demanda de rastreabilidade surge para manter um melhor controle da cadeia produtiva, assim como repassar essas informações aos consumidores.

Outra função do rastreamento é como forma de identificar possíveis parcerias ao atender a uma demanda de fabricação. Ao iniciar uma ordem de fabricação/compra, o próprio produto pode assegurar que todas as especificações escolhidas pelo cliente serão atendidas e, desta forma, o produto pode dar ao cliente estimativas de prazo e custos, assim como o nome de todos os elos da CS que estarão envolvidos nesta fabricação/entrega.

A “**Integração dos membros da CS e eficiência logística**” acontece com a melhoria da comunicação entre os elos utilizando o produto (ativo) como centro de interação.

A comunicação passa a ser centralizada no produto e não mais dependente do contato direto entre as partes. Isso simplifica também a logística reversa, como no caso de solicitações de devolução, acionamento de garantia, *recalls* e outros, que agora utilizarão o produto como um ponto de intermediação entre as partes (por exemplo, fabricante e consumidor final).

Outro ponto de melhor integração com a utilização do produto como centro das interações é com relação à documentação. O submodelo de documentação conterá todos os documentos digitais referentes ao ativo. Desta forma, manuais, notas fiscais, certificados de manutenção e outros documentos podem ser escritos, lidos e atualizados pelos parceiros da CS mediante autenticação.

O compartilhamento de documentos digitais permite uma maior interação com as partes e garante que cada membro terá sempre a versão mais atualizada de cada documento, favorecendo assim sua gestão, reduzindo o uso do papel e tornando os ambientes de trabalho mais seguros, ágeis e organizados.

Os documentos representam uma conexão entre os membros da CS, portanto, comunicados, formulários de troca, documentos para acionamento de garantia e quaisquer outras operações podem ser solicitadas com base na MDP do produto.

3.3.2 Melhoria de projeto do produto

Porter e Heppelmann (2015) classificaram o valor das informações dos produtos em quatro áreas: monitoramento, controle, otimização e autonomia. Por meio da análise da descrição das funcionalidades e capacidades de cada área, foi feito um mapeamento para o contexto do eixo “ciclo de vida e cadeia de valor” do RAMI4.0.

As informações no que diz respeito à melhoria de projeto foram então reclassificadas sob o contexto do RAMI4.0 levando em consideração os submodelos apresentados na seção 3.2. As seguintes categorias foram então identificadas:

- Identificação e reparo de falhas de projeto (submodelos “Operação” e “Processos”);
- Melhoria da interação do usuário com o produto (submodelo “Operação”);
- Geração de indicadores (submodelos “Operação” e “Processos”).

Estas categorias permitem segregar as informações de acordo com os objetivos de projeto que cada uma dessas informações possui.

A seguir são apresentadas as descrições de cada uma das categorias:

A “**Identificação e reparo de falhas de projeto**” permite o monitoramento remoto e identificação de eventuais falhas por meio da análise de dados de diferentes instâncias de produtos e a identificação de padrões de funcionamento.

A identificação de potenciais falhas pode ser realizada, por exemplo, por meio da leitura direta de sensores de temperatura e vibração de diversos produtos de um mesmo

modelo. Valores discrepantes do esperado podem, então, serem identificados em uma amostra. Os eventuais erros estruturais de projeto devem ser reparados.

A “**Melhoria da interação do usuário com o produto**” se dá pela exploração e análise das informações que descrevem a maneira e padrões como o usuário interage com o produto. Desta forma, as informações são utilizadas pelo fabricante para a determinação de funções que podem não ser claras para os usuários ou funções que estão sendo utilizadas de maneira incorreta.

Mudanças na ergonomia e melhorias na intuitividade das funções de operação são mudanças de projeto que elevam a experiência do usuário com o produto e causam uma maior percepção de valor.

A melhoria de interação se dá também pela adição ou remoção de funcionalidades já existentes. A partir da análise de padrões de uso é possível determinar como o produto é realmente utilizado e, a partir disso, levantar a necessidade da adição de novas funcionalidades ou até mesmo a remoção de funções pouco utilizadas.

O monitoramento das características operacionais é uma forma de evoluir o projeto por meio de sua simplificação. Desta forma, atende-se às reais necessidades do usuário e se evita produtos inflados de funcionalidades ou com funcionalidades importantes faltando.

A “**Geração de indicadores**” traz conhecimento que auxilia na tomada de decisões. Alguns indicadores dependem das circunstâncias de operação do equipamento e, portanto, variam em relação ao valor estabelecido pelo fabricante. Por meio dos indicadores, o fabricante é capaz de investigar problemas e eventualmente reprojetar o equipamento. Além disso, o próprio gestor dos equipamentos pode identificar possíveis melhorias em processos a fim de atingir determinadas metas.

Os indicadores de volume de emissão de gases e materiais particulados podem, por exemplo, serem usados em auditorias para adequação às condições legais e regulatórias no país e/ou para atender às condições de saúde e bem estar do trabalhador.

A eficiência global do equipamento e o consumo energético são outros exemplos de indicadores a serem gerados e atualizados instantaneamente.

4 Arquitetura para compartilhamento de informações do produto

Este capítulo tem o objetivo de apresentar a arquitetura proposta baseada em *Web Services* (WS) e compatível com os Componentes 4.0 (C4.0) para o compartilhamento de informações de produtos ao longo da CS.

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

Na I4.0 os ativos se apresentam em diversas formas. Entretanto, nesta arquitetura proposta, os ativos tratados são os produtos, uma vez que este é o ativo que percorre a CS e gera as informações a serem compartilhadas.

4.1 Componentes e operações da arquitetura

Os serviços no escopo desta arquitetura são representações das funcionalidades dos C4.0 e são fornecidos e consumidos entre os próprios C4.0s.

A forma de fornecimento e consumo de serviços proposta nesta arquitetura segue a abordagem de um *Web Service*, com os seus componentes e operações (vide [Figura 19](#)), porém adaptados ao C4.0.

Esta arquitetura envolve três atores básicos: O C4.0-Cliente, o C4.0-Servidor e o C4.0-Repositório; e três operações: publicação, busca e interação.

Os serviços disponibilizados remotamente pelo C4.0-Servidor escutam e respondem solicitações de C4.0-Clientes por meio de uma determinada rede e porta de comunicação. Os C4.0-Clientes, por sua vez, consomem o serviço disponibilizado pelo C4.0-Servidor por meio de solicitações.

Nesta seção são apresentados detalhes sobre os C4.0s e as operações necessárias para o fornecimento de serviços no mundo conectado da I4.0.

4.1.1 Componentes

Os C4.0s da arquitetura e suas inter-relações são apresentados na [Figura 26](#).

De maneira sucinta, os C4.0s são descritos da seguinte forma: “C4.0-Servidor” é a parte que possui um serviço a oferecer para os demais C4.0s no mundo conectado, o “C4.0-Cliente” é a parte que necessita de um serviço e que age ativamente para receber este serviço, e o “C4.0-Repositório” é a parte que armazena informações sobre descrições de diversos serviços, que são disponibilizados na forma de contratos.

A [Tabela 10](#) lista os C4.0s da arquitetura e suas respectivas descrições detalhadas.

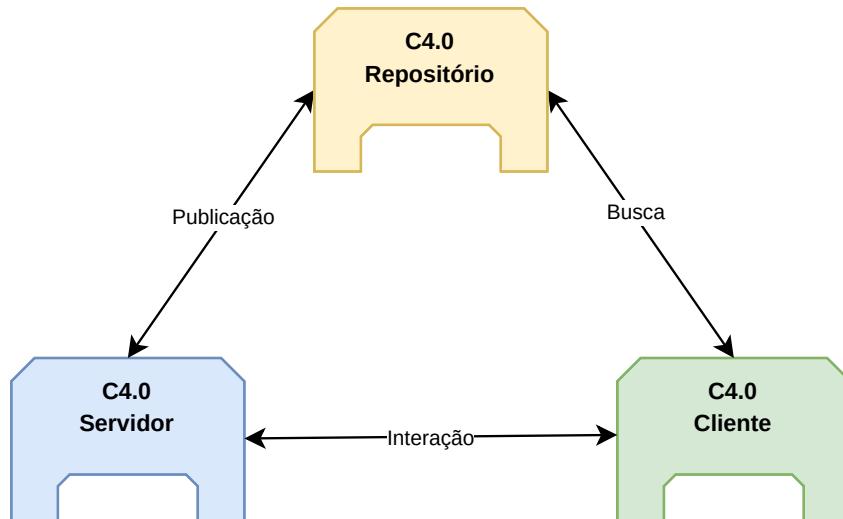


Figura 26 – Componentes e operações.

Tabela 10 – Componentes da arquitetura proposta.

Componente	Descrição
C4.0-Servidor	O C4.0-Servidor é fonte de informações. Este C4.0 extrai as informações sobre seu ativo para sua própria MDP para que assim possam ser disponibilizadas na rede. Cada submodelo do AAS representa um conjunto de informações e serviços semelhantes agrupados.
C4.0-Cliente	O C4.0-Cliente é a parte que irá consumir as informações disponibilizadas pelo C4.0-Servidor. O C4.0-Cliente representa cada uma das partes envolvidas na CS. Pode representar uma instituição, uma pessoa física ou até mesmo uma outra máquina/produto.
C4.0-Repositório	O C4.0-Repositório é o elemento que recebe, armazena e disponibiliza informações de descrição sobre todos os serviços disponíveis no mundo conectado. As descrições de serviços são disponibilizadas em forma de contratos. Este componente recebe operações de “publicação” por parte do C4.0-Servidor e operações de “busca” por parte do C4.0-Cliente. O C4.0-Repositório não atua como canal de comunicação entre C4.0-Cliente e C4.0-Servidor, mas apenas fornece informações necessárias para que ambos os C4.0s possam se comunicar diretamente por meio da operação de “interação”.

O contrato contendo a descrição dos serviços disponíveis nos submodelos de cada C4.0-Servidor é armazenado em um C4.0-Repositório comum, onde todos os C4.0s disponíveis no mundo conectado na I4.0 podem se tornar visíveis. O serviço é fornecido pelo próprio C4.0-Servidor que o tornou público, servindo o C4.0-Repositório apenas como um elemento para a descoberta de serviços.

É importante notar que no mundo da I4.0 todo ativo é englobado por um AAS e se torna um C4.0. O C4.0-Repositório também se refere um ativo, que no caso é o *software* que gerencia os relacionamentos das descrições dos serviços e detém informações e funções que agregam valor ao negócio. O C4.0-Repositório, portanto, é o ativo que assegura a

interação com outros C4.0s na I4.0.

Cada C4.0 pode atuar tanto como um fornecedor de serviços (C4.0-Servidor), quanto como um solicitante de serviços (C4.0-Cliente), ou como ambos. Sempre usando o C4.0-Repositório como meio para a publicação ou busca dos serviços.

4.1.2 Operações

As descrições das operações dos serviços são apresentadas na [Tabela 11](#). As inter-relações entre C4.0s por meio das operações são mostradas na [Figura 26](#).

Tabela 11 – Operações do WS para a interação entre C4.0s.

Operação	Descrição
Publicação	Ação tomada pelo C4.0-Servidor sempre que este queira anunciar um serviço para que possa ser descoberto por um C4.0-Cliente. Nesta operação, o C4.0-Servidor envia o contrato descrevendo os serviços ofertados e a descrição de cada um desses serviços. Esta lista é recebida e armazenada pelo C4.0-Repositório, que a disponibiliza para acesso público.
Busca	Ação tomada pelo C4.0-Cliente sempre que este precise consultar serviços de seu interesse. Nesta operação o C4.0-Cliente faz uma solicitação ao C4.0-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 C4.0-Repositório para o C4.0 Cliente.
Interação	Ação tomada pelo C4.0-Cliente sempre que este deseja invocar um serviço. O C4.0-Cliente estabelece uma conexão direta com o C4.0-Servidor e consome o determinado serviço solicitado. A operação de interação normalmente é feita após o recebimento da lista de contratos por parte do C4.0-Repositório, porém a interação pode ser feita diretamente caso o C4.0-Cliente já possua informações necessárias para o estabelecimento da conexão em <i>cache</i> .

Para cada uma das operações deve ser definido o contrato, documento o qual descreve as funcionalidades do serviço e estabelece os padrões de comunicação suportados pelo C4.0-Servidor como, por exemplo, o padrão HTTP REST, HTTP SOAP, gRPC, etc; e especifica como acessar e quais são as operações ou métodos que estão disponíveis no serviço.

Quando o C4.0 atua como C4.0-Servidor, este publica seu contrato no C4.0-Repositório por meio de uma API (*Application Programming Interface*). Quando atua como cliente, o C4.0 busca no C4.0-Repositório um serviço desejado e recebe uma lista de opções de serviços com suas respectivas descrições (contidas no contrato). Assim, o serviço mais adequado pode ser selecionado.

Uma vez definido o serviço a ser consumido, o C4.0-Cliente estabelecerá a conexão direta com o C4.0-Servidor, utilizando os detalhes contidos no contrato para localizar, contactar e invocar o serviço.

A Figura 27 apresenta um diagrama PFS (*Production Flow Schema*) (vide [seção 2.6](#)), com o fluxo de ocorrência das operações básicas para a interação entre C4.0s.

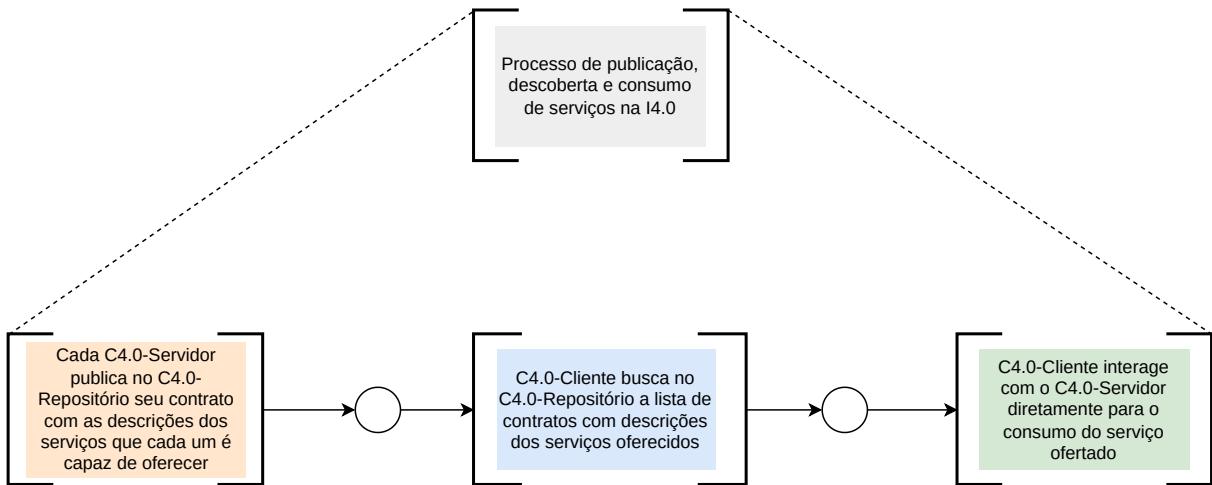


Figura 27 – Diagrama PFS das operações.

Os serviços fornecidos por um C4.0 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 CS. Ou seja, os serviços que extraem informações da MDP do C4.0 e as fornecem, mediante autenticação, às partes solicitantes ao longo da CS.

4.2 Fluxo de fornecimento de serviços

As etapas para o fornecimento de serviços na I4.0 seguem um fluxo padrão. Os submodelos agregam informações semelhantes que podem ser lidas ou escritas (via MDP) e disponibilizada a qualquer uma das partes ao longo da CS.

Um fluxo de leitura/escrita de dados pode ser exemplificado com uma CS simples contendo três membros: um fabricante, um distribuidor e um consumidor; cada membro da CS é um C4.0-Cliente diferente. O fabricante cria o produto, que será o C4.0-Servidor, e define a estrutura do AAS com os submodelos necessários (vide [seção 3.2](#)). A título de exemplo, três submodelos são definidos: submodelo “Pedido”, submodelo “Operação” e submodelo “Documentação”. Ao longo do ciclo de vida do produto, os membros da CS (fabricante, distribuidor e consumidor) podem interagir com esses submodelos, fazendo

sua leitura para o caso dos submodelos de pedido e operação, e podendo fazer a leitura e/ou escrita para o caso do submodelo de documentação.

A [Figura 28](#) demonstra este cenário mencionado com o fluxo de operações básicas do serviço em funcionamento. Neste exemplo, o (a) C4.0-Servidor de um produto mantém contato com o (b) C4.0-Cliente do fabricante, com o (c) C4.0-Cliente do distribuidor, e com o (d) C4.0-Cliente do consumidor final, fornecendo o serviço de consulta de informações de diferentes submodelos para cada um dos solicitantes.

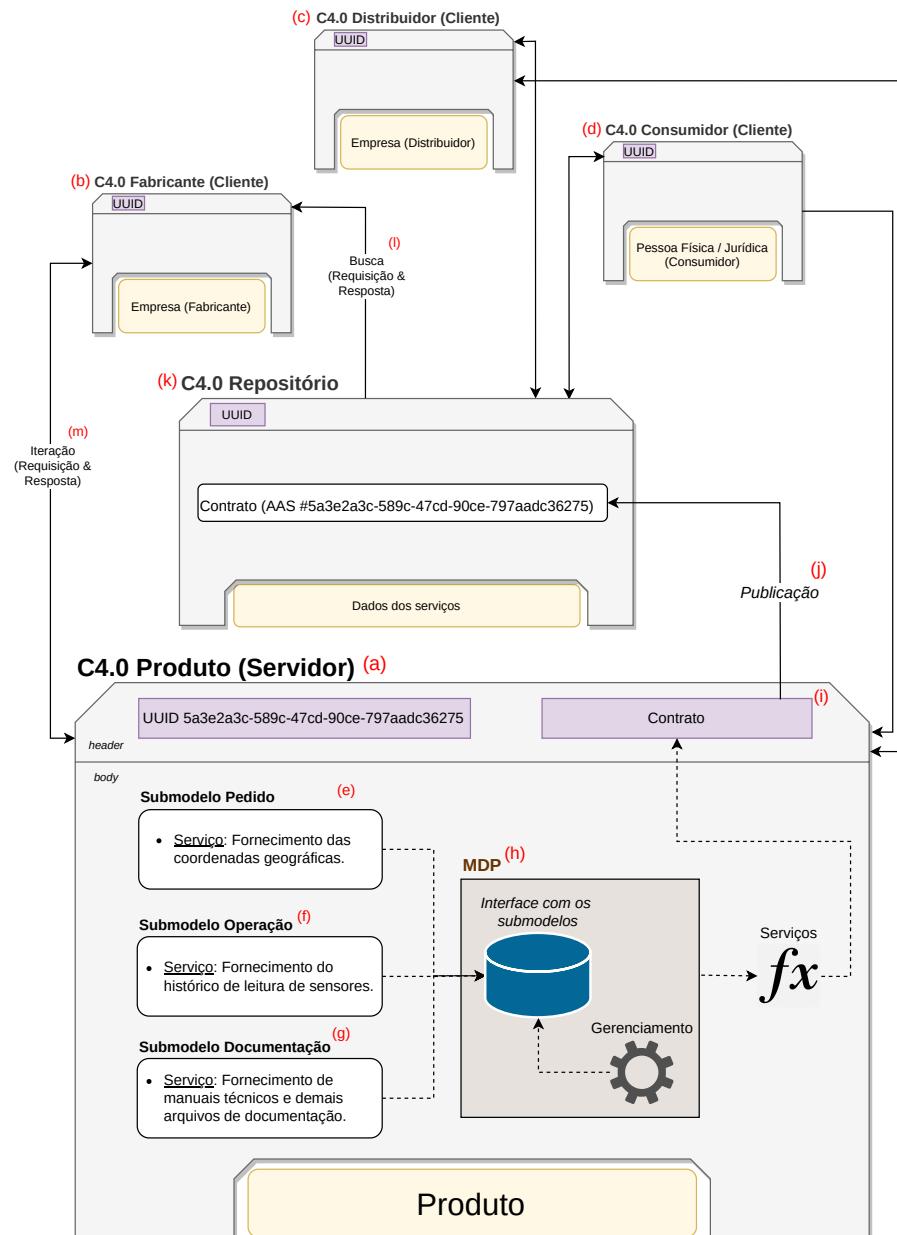


Figura 28 – Exemplificação das operações de publicação e busca com múltiplos C4.0-Clientes.

Na [Figura 28](#) também são mostrados os três submodelos do C4.0-Produto: (e) Submodelo “Pedido”, (f) submodelo “Operação” e (g) submodelo “Documentação”. A

(h) MDP realiza o gerenciamento dos dados de todos os submodelos e os disponibiliza para acesso pelos serviços. As descrições dos serviços são armazenados em forma de um (i) contrato. Este contrato é (j) publicado no C4.0-Repositório.

O (k) C4.0-Repositório recebe o contrato do C4.0-Produto e o disponibiliza para consulta. O C4.0-Repositório pode receber também contratos de diversos outros C4.0s do mundo conectado da I4.0.

Os C4.0-Clientes fazem a (l) busca no C4.0-Repositório. A requisição da busca é feita com parâmetros a fim de se restringir qual tipo de serviço aquele C4.0-Cliente pretende consumir, podendo-se restringir a busca, inclusive, ao serviço de um C4.0 específico, identificando-o por meio de seu identificador único.

Cada C4.0-Cliente (Fabricante, Distribuidor ou Consumidor), portanto, realiza a consulta ao C4.0-Repositório com os parâmetros de interesse e recebe a resposta de contratos contendo descrições detalhadas sobre os serviços disponíveis e informações para localizar, contactar e invocar estes serviços.

Após o recebimento da resposta da busca pelo C4.0-Repositório, é feita a decisão interna em cada C4.0-Cliente sobre qual serviço selecionar. Uma vez definido, o C4.0-Cliente estabelece uma (m) interação com o C4.0-Servidor (produto), isto é, uma comunicação direta para o consumo do serviço selecionado.

Este é um exemplo de consulta única. Em aplicações reais, o C4.0-Cliente normalmente solicita o serviço de diversos C4.0-Servidores ao mesmo tempo, como, por exemplo, um fabricante solicitando informações de todas as máquinas (produtos) de um modelo específico que foram vendidas a consumidores espalhados pelo mundo para realizar análise de dados a fim de se fazer a identificação de potenciais falhas e promover uma manutenção preditiva. Tal cenário é demonstrado em forma de um segundo exemplo na [Figura 29](#).

Neste cenário há uma consulta por parte de um C4.0-Cliente a múltiplos produtos. Neste exemplo, cada C4.0-Produto (a, b e c) realiza uma operação de (f) publicação no (e) C4.0-Repositório.

O (d) C4.0-Cliente (fabricante) por sua vez faz uma (g) busca no C4.0-Repositório especificando os parâmetros que restrinjam a pesquisa somente a determinados modelos de produtos, e recebe como resposta todas as descrições dos serviços que correspondem aos critérios de busca.

A partir da resposta da busca no C4.0-Repositório, o C4.0-Cliente do fabricante pode (h) interagir diretamente com cada um dos C4.0-Servidores (produtos) para o consumo das informações necessárias.

4.3 Mapeamento das operações para as camadas do RAMI4.0

Segundo [IEC \(2017\)](#), o RAMI4.0 fornece uma visão estruturada de um sistema produtivo dentro da I4.0 por meio de uma representação tridimensional. Desta forma,

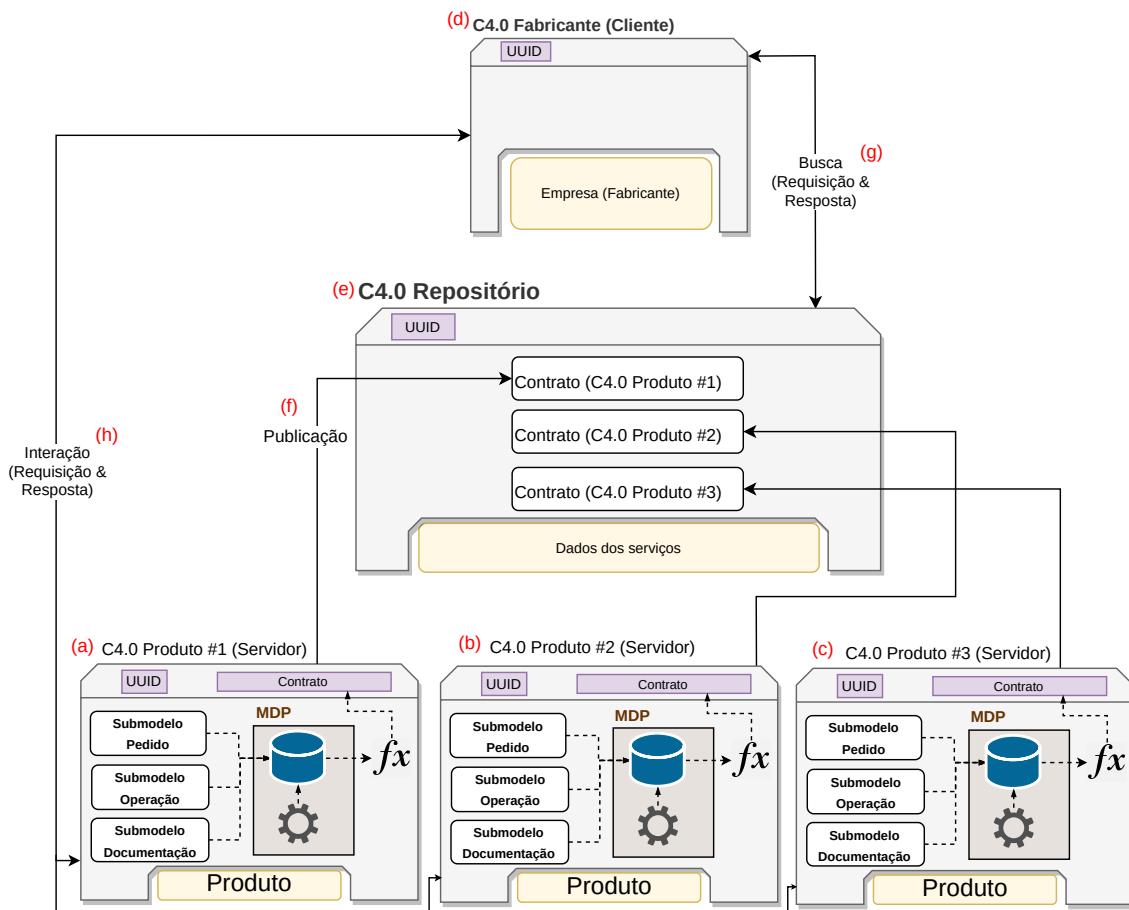


Figura 29 – Exemplificação das operações de publicação e busca com múltiplos produtos.

inter-relações complexas podem ser divididas em seções menores e mais gerenciáveis, combinando os três eixos para representar cada aspecto relevante do estado do ativo em cada ponto de seu ciclo de vida.

Esta seção tem o objetivo de mapear as operações envolvidas no compartilhamento de informações ao longo da CS para a estrutura do RAMI4.0 de forma a representar as etapas relacionadas ao trânsito de informações.

O mapeamento para o RAMI4.0, contribui para facilitar a execução de implementações da I4.0 uma vez que garante a interoperabilidade entre os sistemas.

4.3.1 Funcionalidades das camadas do RAMI4.0

Na [subseção 2.1.1](#) foram apresentados os detalhes do RAMI4.0 e o detalhamento de cada nível do eixo Camadas com suas funções genéricas. Nesta subseção são mostradas as funções específicas da arquitetura proposta para cada camada do eixo Camadas do RAMI4.0 sob o contexto do compartilhamento de informações pela CS.

Na camada **Ativo Técnico** estão os produtos (fontes de informações), consumidores diversos (empresas, pessoas, consumidores das informações) e os *softwares* repositórios que armazenam os contratos.

Para o compartilhamento de informações do produto no mundo I4.0, os dados a serem extraídos do ativo são estrategicamente selecionados com o objetivo de reunir somente os que agreguem valor ao próprio ativo. Assim, estes dados selecionados são extraídos do ativo e repassados às camadas superiores para que possam ser armazenados e compartilhados por meio de serviços.

A camada **Integração** está presente em todos os componentes (C4.0-Servidor, C4.0-Cliente e C4.0-Repositório). Porém tanto o C4.0-Cliente quanto o C4.0-Repositório operam primariamente nas camadas digitais e possuem esta camada somente para outros fluxos de integração internos da empresa, seja ele um *software* (por exemplo uma base de dados de ERP) ou um ativo físico. Já a camada de Integração no C4.0-Servidor tem a função mais axiomática para compartilhamento de informações do ativo uma vez que é responsável pela virtualização das informações que são extraídas do ativo e repassadas para as camadas superiores.

Com relação à camada **Comunicação**, na arquitetura de compartilhamento de informações, não há comunicação entre C4.0s dentro da mesma empresa uma vez que todas as operações de um WS (publicação, busca e interação) ocorrem entre organizações distintas. Esta camada, entretanto, é necessária para as diversas outras comunicações dentro da própria organização. Os protocolos estabelecidos nesta camada para a integração vertical são independentes dos protocolos para a integração horizontal, que são definidos na camada Funcional.

A camada **Informação** está presente em todos os componentes. No C4.0-Repositório ela é responsável pelo acesso aos contratos disponibilizados por cada produto e pelo processamento das requisições dos C4.0-Clientes. No C4.0-Servidor, esta camada armazena as informações nos submodelos e as disponibiliza por meio da MDP. No C4.0-Cliente, ela é responsável pelo processamento das informações recebidas pelo C4.0-Repositório (para a seleção do serviço adequado) e pelo C4.0-Servidor (para o tratamento das informações recebidas).

Na camada **Funcional** ocorre a integração horizontal entre as partes da CS de um produto. Os serviços são disponibilizados por meio da camada funcional, portanto esta é a interface entre os C4.0s de diferentes empresas.

Para o fornecimento e consumo dos serviços de compartilhamento de informações nesta camada, devem ser definidas as especificações das APIs, ou seja, o padrão de requisição e resposta para o fornecimento e consumo de serviços como, por exemplo, o padrão REST.

Na camada **Regra de Negócio** se tem as restrições aplicadas sobre os serviços, como as políticas de privacidade de dados (e.g., restrições de acesso a determinados

serviços) e as restrições legais de cada país.

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

Para cada tipo de operação relacionada a um C4.0, 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 destas soluções por diversos desenvolvedores de sistemas resulte em sistemas que sejam interoperáveis, independentemente da tecnologia adotada.

O C4.0 pode ainda ser mais detalhadamente especificado, identificando se este representa um produto em desenvolvimento ou um produto em produção. Estes detalhes são cobertos pelo eixo “Ciclo de Vida e Cadeia de Valor”, e considerações sobre este eixo envolvendo a arquitetura proposta foram apresentadas no [Capítulo 3](#).

- **Ativo:** empresas e pessoas (referente ao C4.0-Cliente), produto (referente ao C4.0-Servidor) e os *softwares* repositórios (referente ao C4.0-Repositório);
- **Integração:** protocolos de transferência de dados (Ethernet, 5G, Wi-Fi, etc);
- **Comunicação:** protocolos de comunicação para promover a integração vertical (OPC UA, MQTT);
- **Informação:** contratos (descrição dos serviços), submodelos, MDP;
- **Funcional:** protocolos de comunicação para promover a integração horizontal (HTTPS, gRPC, etc), *Web Services* para o compartilhamento de informações (serviços em forma de APIs);
- **Regra de negócio:** restrições legais, políticas de privacidade.

A [Figura 30](#) apresenta os elementos envolvidos no compartilhamento de informações (fornecimento de serviços) dentro do eixo Camadas do RAMI4.0.

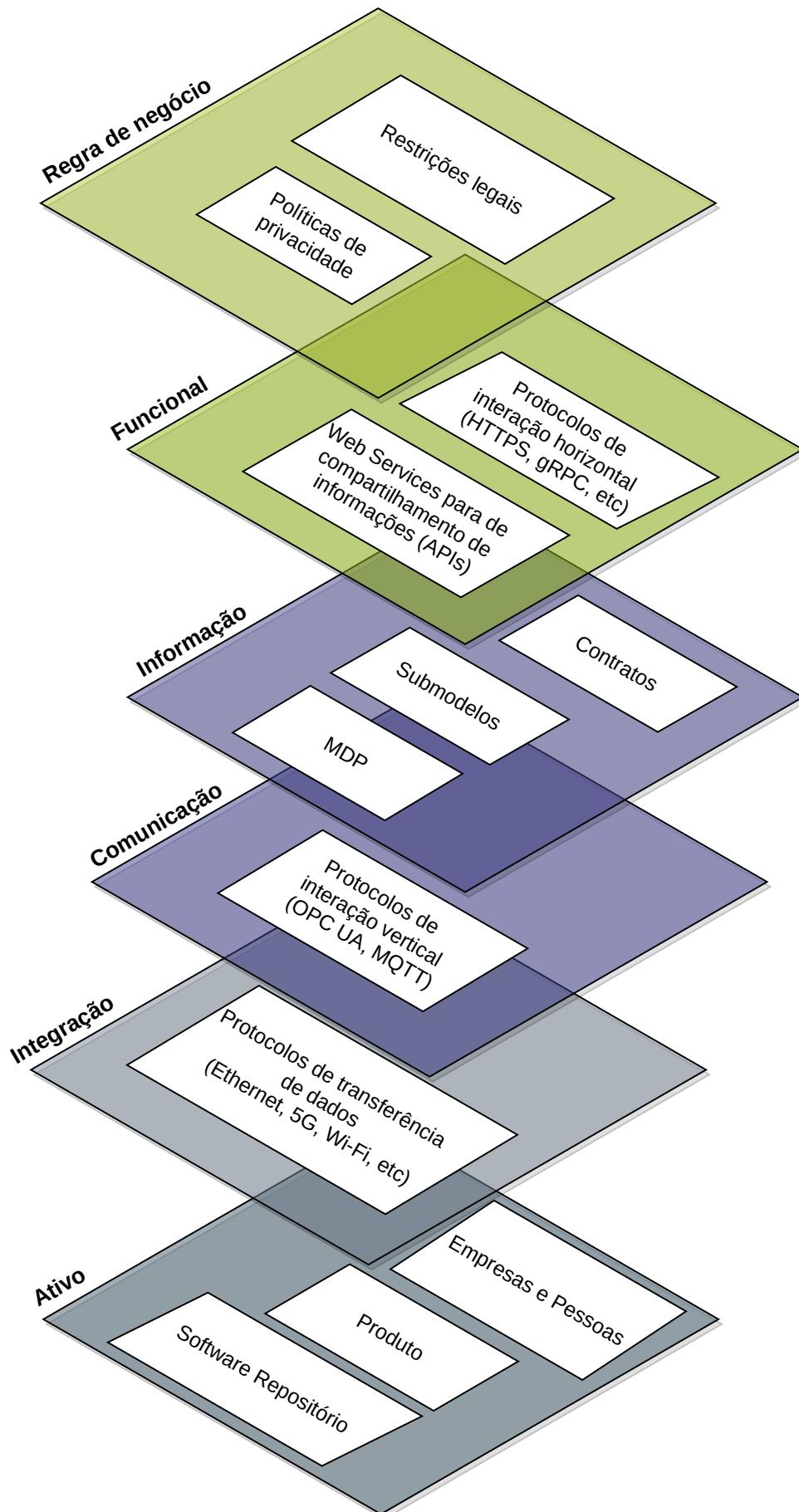


Figura 30 – Camadas do RAMI4.0 com os elementos envolvidos no compartilhamento de informações (fornecimento de serviços).

4.3.2 Operação de Publicação

A Figura 31 apresenta diagramas PFS do fluxo de atividades para a operação de publicação de um C4.0-Servidor em um C4.0-Repositório.

A operação de publicação se inicia sempre que um C4.0 for instalado ou quando esse C4.0 for atualizado.

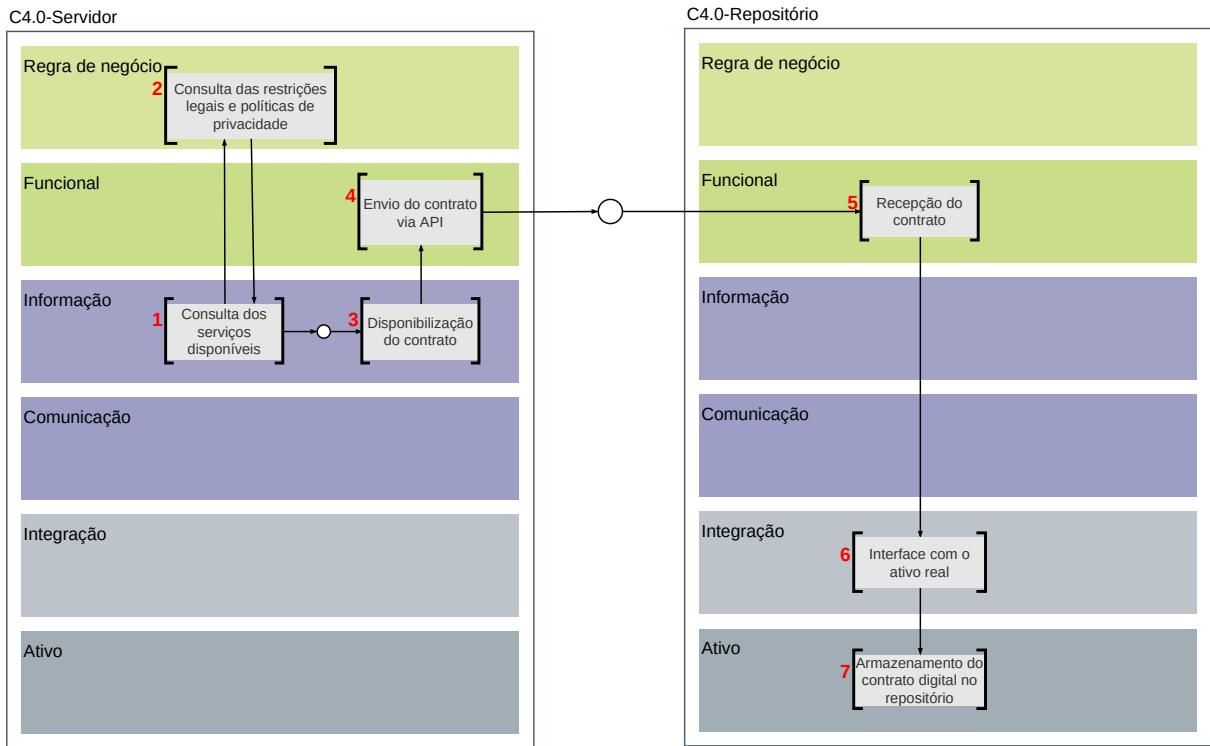


Figura 31 – Diagrama PFS da operação de publicação.

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

1. Os serviços de compartilhamento de informações do C4.0-Servidor disponíveis são identificados e listados.
2. As restrições legais e as políticas de privacidade para um determinado C4.0 são acessadas. Esta atividade adiciona restrições aos serviços a serem publicados. Estas restrições serão incorporadas à descrição de cada serviço a ser publicado.
3. O contrato contendo as descrições de serviços disponíveis no C4.0-Servidor é disponibilizado.
4. O contrato é enviado ao C4.0-Repositório via API.

5. O C4.0-Repositório recebe o contrato no formato de intercâmbio definido. A descrição dos serviços nesta fase já contém todas as informações para a identificação do serviço e de seu componente correspondente.
6. Os dados recebidos alimentam uma interface para comunicação com o ativo real.
7. O contrato com a lista das descrições dos serviços é armazenado junto aos demais contratos na base de dados do C4.0-Repositório.

4.3.3 Operação de Busca

A operação de busca é dividida em duas partes: a requisição e a resposta. A requisição é a iniciativa do C4.0-Cliente de requerer a lista de contratos contidas em um C4.0-Repositório, que descreve os serviços de cada ativo cadastrado. O fluxo de atividades da requisição em uma operação de busca é apresentado na [Figura 32](#).

Já a resposta da requisição em uma operação de busca é feita pelo C4.0-Repositório para o C4.0-Cliente e é apresentada na [Figura 33](#).

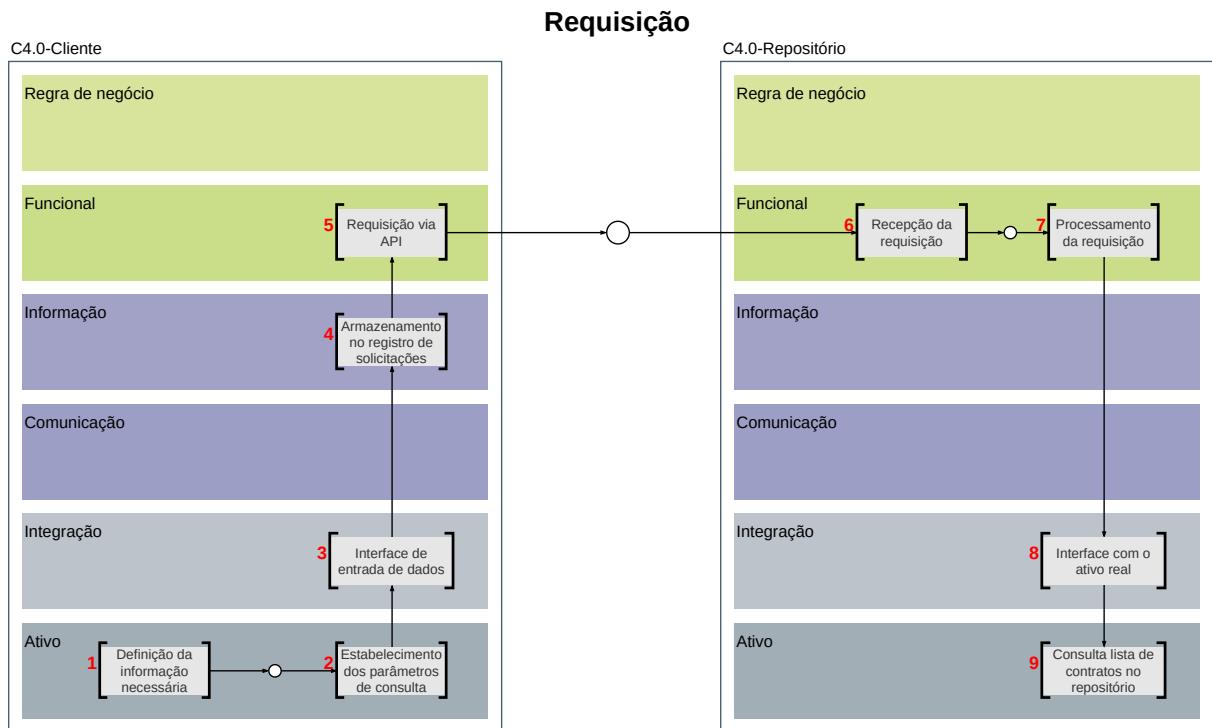


Figura 32 – Diagrama PFS da requisição em uma operação de busca.

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

1. O processo de requisição se inicia com a definição por parte do ativo do C4.0-Cliente (pessoa ou empresa) sobre qual informação se deseja consultar como, por exemplo, leituras de sensores, localização geográfica, manuais, etc.
2. A partir do tipo de informação a ser consultada, define-se os parâmetros de consulta, que representam o conjunto de restrições que estabelecem qual é exatamente o tipo de serviço que o C4.0-Cliente deseja consumir. Para os serviços que visam a extração de informações do ativo, os parâmetros representam, por exemplo, o ID do provedor de serviços, o horário e data de um determinado evento, uma filtragem por modelos específicos de um produto, etc.
3. Os parâmetros de consulta alimentam uma interface para que a solicitação possa ser virtualizada e integrada ao C4.0-Cliente. Nesta atividade a intenção de solicitação de um serviço é virtualizada.
4. Opcionalmente, são armazenados os detalhes da solicitação em um registro de solicitações.
5. A requisição é enviada ao C4.0-Repositório via API.
6. O C4.0-Repositório recebe a solicitação e a insere ao final da lista de solicitações para ser processada.
7. A requisição é processada. Identifica-se nesta atividade se a requisição é válida e se ela contém todos os parâmetros necessários para a consulta.
8. Estabelece-se uma interface para a interação com o ativo real para a consulta das informações solicitadas na requisição.
9. Realiza-se a leitura da lista de contratos na base de dados do C4.0-Repositório utilizando os parâmetros de consulta estabelecidos.

Após a requisição, o C4.0-Repositório envia a resposta ao C4.0-Cliente. O fluxo de atividades da resposta é apresentado em diagramas PFS na [Figura 33](#).

Detalhadamente, a resposta do C4.0-Repositório segue o fluxo de atividades, começando pela disponibilização das informações reais do ativo:

1. As informações do *software* repositório contendo os contratos são acessadas e disponibilizadas para as camadas superiores.
2. Os dados disponibilizados são virtualizados para a integração com o AAS.
3. O contrato contendo as descrições dos serviços é disponibilizado para acesso por parte da camada Funcional. A lista pode conter serviços válidos, assim como pode conter mensagens de erro por conta de solicitações inválidas ou buscas retornando zero correspondências.

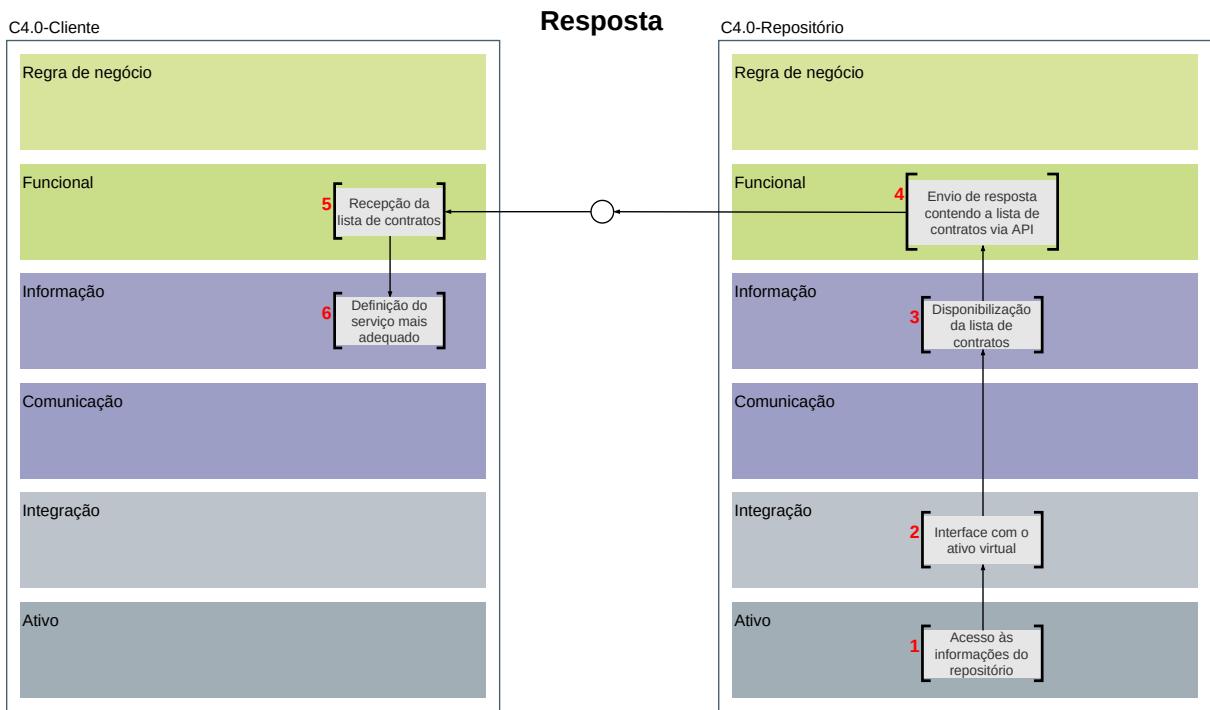


Figura 33 – Diagrama PFS da resposta em uma operação de busca.

4. A resposta é enviada ao C4.0-Cliente via API.
5. O C4.0-Cliente recebe a resposta contendo os contratos no formato de intercâmbio definido.
6. Após a recepção da lista de contratos contendo todos os serviços disponíveis, é feito o processamento para a definição do serviço mais adequado. Esta fase geralmente não fornece múltiplas opções para a consulta de serviços de compartilhamento de informações ao longo da CS uma vez que os parâmetros de consulta na requisição geralmente já delimitam exatamente o serviço e o produto desejado.

4.3.4 Operação de Interação

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

A [Figura 34](#) apresenta o fluxo de atividades em uma requisição de um serviço e a [Figura 35](#) a resposta do C4.0-Servidor.

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

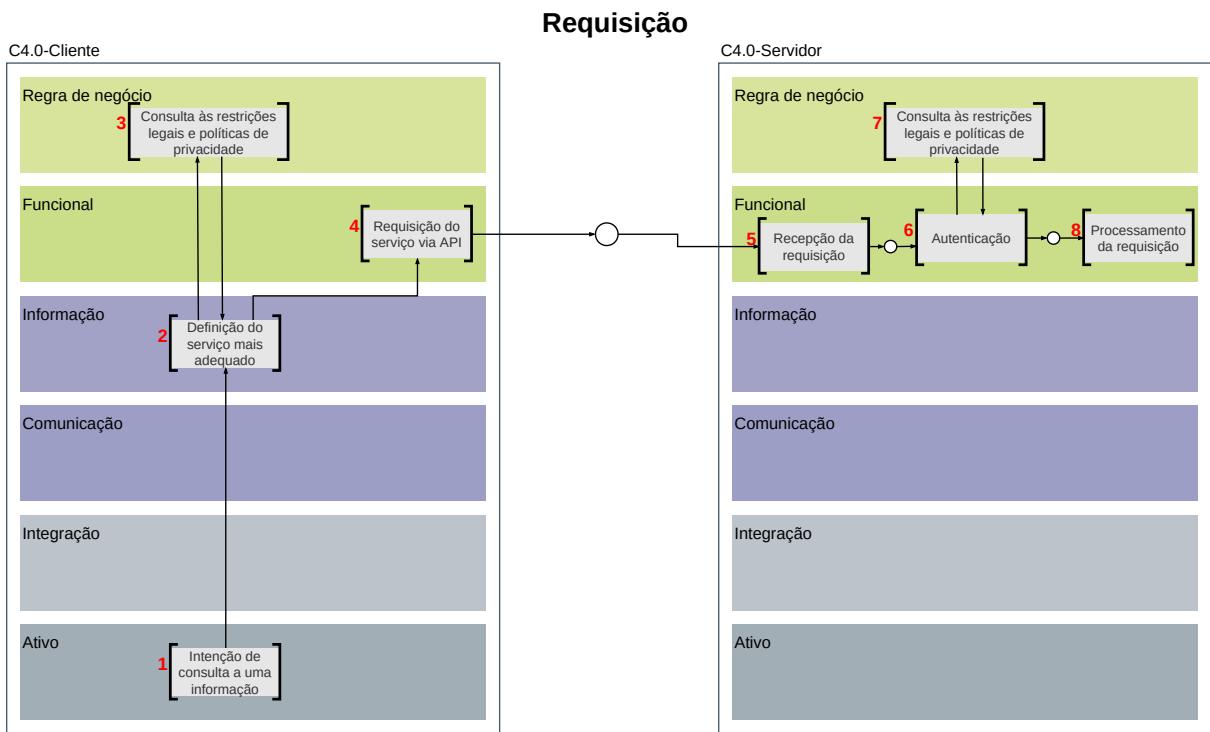


Figura 34 – Diagrama PFS da requisição de um serviço em uma operação de interação.

1. Surge a necessidade de uma informação por parte do C4.0-Cliente.
2. Define-se qual é o serviço mais adequado e de qual C4.0-Servidor esta informação será consumida.
3. As restrições legais e as políticas de privacidade do C4.0-Cliente são consultadas. Essas regras de negócio são incorporadas ao processamento sobre a definição do serviço mais adequado a ser escolhido.
4. A requisição do serviço é enviada ao C4.0-Servidor via API.
5. O C4.0-Servidor recebe a requisição e a insere ao final da lista de requisições para ser processada.
6. É feita a autenticação da identidade do C4.0-Cliente e a autorização para o consumo do serviço. Nesta atividade é verificada a autorização para consumir o serviço e consequentemente os dados que estão sendo solicitados.
7. Consulta-se as restrições legais e as políticas de privacidade do C4.0-Servidor para a autorização ou bloqueio do fornecimento do serviço ao solicitante.
8. A requisição é processada. Identifica-se nesta atividade se a requisição é válida e se ela contém todos os parâmetros necessários para o fornecimento do serviço.

Após o recebimento e processamento da requisição de um serviço, o C4.0-Servidor deve fazer a extração e envio das informações de seu próprio ativo. A resposta contendo as informações sobre o ativo começa a partir da emissão de um novo evento ou, caso a informação já esteja disponível na MDP, começa direto da camada de informação. Esta informação percorre um fluxo padrão para que seja disponibilizada ao C4.0-Cliente por meio do serviço. A [Figura 35](#) mostra as atividades do fluxo de resposta.

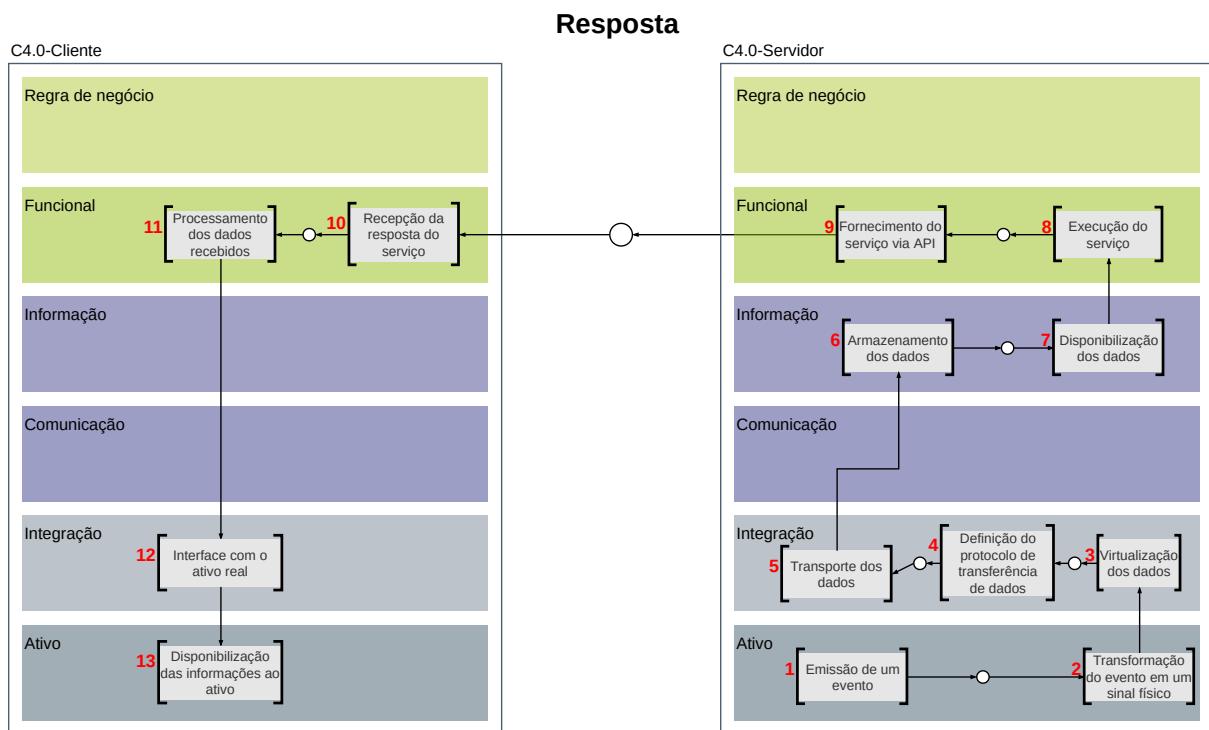


Figura 35 – Diagrama PFS da resposta de um C4.0-Servidor ao se solicitar um serviço.

O detalhamento do fluxo de atividades da resposta é detalhado a seguir:

1. Um evento físico no mundo real é emitido.
2. O evento é transformado em sinais físicos e são fornecidos às camadas superiores.
3. Os sinais físicos são interpretados e virtualizados. Nesta atividade é criado um correspondente virtual para o evento do ativo físico, ou seja, os dados são digitalizados e disponibilizados ao C4.0-Servidor.
4. É definido o meio de transporte e o protocolo de transferência de dados como, por exemplo, o Wi-Fi, Ethernet, 5G, etc.
5. Os dados são devidamente transportados pelo meio e protocolo definidos até uma central de processamento.

6. Os novos dados sobre o ativo são armazenados pela MDP nos submodelos junto aos demais dados já existentes.
7. Os dados são disponibilizados ao serviço.
8. O serviço é executado e sua resposta é gerada. O serviço pode executar quaisquer operações sobre os dados atualizados sobre o ativo assim como sobre o histórico de registros antigos já disponíveis nos submodelos.
9. A resposta do serviço (fornecimento do serviço) é enviada via API.
10. O C4.0-Cliente recebe a resposta do serviço em um dos formatos de intercâmbio padronizados ([BADER et al., 2019b](#)).
11. Os dados recebidos na resposta são processados.
12. As informações geradas alimentam uma interface para comunicação com o ativo real.
13. As informações do C4.0-Servidor processadas são disponibilizadas ao C4.0-Cliente.

Caso a informação sendo consultada já esteja contida na MDP do C4.0-Servidor (na camada Informação), o fluxo de resposta começa do passo 7, já que neste caso não é necessária a extração dos dados diretamente do ativo (passos 1 – 6).

4.4 Considerações sobre a análise dinâmica do modelo

Os modelos PFS apresentados na [seção 4.3](#) descrevem cada operação da arquitetura e a conexão entre os componentes. Estes modelos, que são representações de Sistemas a Eventos Discretos (SED), demonstraram características de sequências.

A sequência indica uma ordem de realização das atividades na qual um conjunto de atividades deve ser concluído para que outro seja iniciado ([FATTORI et al., 2012](#)), ou seja, apresenta um comportamento linear.

As atividades apresentadas na [seção 4.3](#) detém um alto nível de abstração, porém cada atividade apresentada pode ainda refinada sucessivamente de forma a detalhar cada iteração. A partir do sucessivo detalhamento, novas características podem surgir como paralelismos, conflitos, sincronizações, etc, com as quais é possível analisar outras propriedades do comportamento dinâmico do sistema. O detalhamento das atividades apresentadas na arquitetura não é escopo de estudo deste trabalho.

5 Considerações finais

Este trabalho teve como objetivo geral a elaboração de uma arquitetura baseada no RAMI4.0 para o compartilhamento da MDP ao longo da CS.

A definição de uma arquitetura é essencial para que haja consistência e interoperabilidade entre os membros da CS. Este trabalho abordou este objetivo geral por meio dos objetivos específicos detalhados a seguir:

- **Integração da MDP ao C4.0** ([seção 3.1](#)): os termos C4.0 e MDP surgiram sob contextos distintos, portanto, como passo inicial para o compartilhamento da MDP, foi necessário integrá-la ao C4.0 para que assim seja interoperável com outras partes de um sistema produtivo dentro do contexto da I4.0. Desta forma, todos os componentes do sistema são tratados como C4.0 com diferentes papéis (C4.0-Cliente, C4.0-Servidor e C4.0-Repositório);
- **Levantamento de submodelos do produto e suas propriedades** ([seção 3.2](#)): foram levantadas informações relevantes a serem compartilhadas em uma CS. Estas informações foram classificadas e então inseridas como propriedades agrupadas em submodelos no C4.0;
- **Levantamento dos impactos em geração de valor com o compartilhamento da MDP** ([seção 3.3](#)): foram apresentados os impactos em geração de valor que o compartilhamento dos submodelos propostos trazem. Estes impactos foram classificados como “melhorias operacionais” e “melhorias de projeto”. Também foram feitas considerações sobre como as informações são coletadas ao longo do ciclo de vida do produto, gerando valor continuamente por meio destas melhorias;
- **Detalhamento do componentes e operações da arquitetura** ([seção 4.1](#)): a arquitetura para o compartilhamento da MDP foi apresentada, mesclando os conceitos do RAMI4.0 com a lógica de fornecimento de serviços por meio de WS. Os componentes (C4.0-Cliente, C4.0-Servidor e C4.0-Repositório) e as operações (publicação, busca, interação) foram detalhados;
- **Descrição do processo de compartilhamento de informações** ([seção 4.2](#)): o processo de compartilhamento de informações foi exemplificada por meio de dois cenários realísticos (múltiplos clientes interagindo com um produto e cliente único interagindo com múltiplos produtos);
- **Mapeamento das operações para as camadas do RAMI4.0** ([seção 4.3](#)): o fluxo de informações foi modelado por meio de diagramas PFS. Foram modelados os três tipos de operação (publicação, busca e interação). A partir da modelagem

foi possível visualizar o caminho percorrido pela informação ao longo de todas as camadas do RAMI4.0 para cada C4.0 e a transferência de informação entre os C4.0s por meio de APIs.

5.1 Trabalhos futuros

A arquitetura proposta não está atrelada a tecnologias específicas, podendo estas serem designadas e substituídas conforme conveniência da época. Como provas de conceito, implementações desta arquitetura podem ser exploradas em trabalhos futuros. Estas implementações podem então ser aplicadas para casos reais da indústria e estes casos de uso podem retroalimentar o próprio desenvolvimento da arquitetura original.

Para a representação dos processos para o compartilhamento de informações entre os elos da CS, foi utilizada a técnica PFS (*Production Flow Schema*). As atividades apresentadas partem de um alto nível de abstração, porém cada atividade apresentada pode ser ainda refinada sucessivamente de forma a detalhar cada iteração. A partir do sucessivo detalhamento novas características podem surgir, como paralelismos, conflitos, etc. Dados estas novas características é possível analisar aspectos dinâmicos do sistema. Esta análise pode ser explorada em trabalhos futuros a fim de analisar as propriedades da rede e identificar eventuais *deadlocks*.

A arquitetura proposta adota algumas simplificações, sendo uma delas a consideração das comunicações somente para os casos de sucesso. Desta forma, não são apontadas eventuais exceções ocorridas em tempo de execução como, por exemplo, quando uma informação do produto não for encontrada ou estiver corrompida. Estes e diversos outros cenários de exceção podem ser explorados em revisões futuras da arquitetura para o seu refinamento.

Por fim, considerações sobre privacidade de dados e consentimento do compartilhamento de informações não foram abordadas neste trabalho, porém esta é uma crescente preocupação, dado o impacto que o vazamento de informações restritas podem acarretar. Adequar a arquitetura às leis e normas locais de proteção de dados de cada país onde a CS opera é um importante aspecto a ser considerado para que a arquitetura seja implementada.

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 16.

ADOLPH, L.; AMMON, E.; BAUSCH, U.; BECK, S.; BEDENBENDER, H.; BENTKUS, A.; BILLMANN, M. *German Standardization Roadmap: Industrie 4.0 - Version 3.* Berlin, DIN e.V., 2018. 11–19 p. Disponível em: <www.din.de/go/roadmapindustrie40-en>. Citado 4 vezes nas páginas 21, 23, 25 e 47.

ADOLPHS, P.; BEDENBENDER, H.; DIRZUS, D.; EHLICH, M.; EPPLER, U.; HANKEL, M.; HEIDEL, R.; HOFFMEISTER, M.; HUHLE, H.; KÄRCHER, B.; KOZIOLEK, H.; PICHLER, R.; POLLMEIER, S.; SCHEWE, F.; WALTER, A.; WASER, B.; WOLLSCHLAEGER, M. *Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0).* [S.l.]: ZVEI and VDI, Status report, 2015. 7–26 p. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 25.

ALYAHYA, S.; WANG, Q.; BENNETT, N. Application and integration of an rfid-enabled warehousing management system—a feasibility study. *Journal of Industrial Information Integration*, Elsevier, v. 4, p. 15–25, 2016. Citado na página 33.

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 40.

BADER, S.; BARNSTEDT, E.; BEDENBENDER, H.; BILLMANN, M.; BOSS, B.; BRAUNMANDL, A.; CLAUER, E.; DEPPE, T.; DIEDRICH, C.; FLUBACHER, B.; FRITSCHE, W.; GARRELS, K.; GATTERBURG, A. G.; HANKEL, M.; HILLERMEIER, O.; HOFFMEISTER, M.; JOCHEM, M.; KOGAN, Y.; KOZIOLEK, H.; ZIESCHE, C. *Details of the Administration Shell - From idea to implementation.* Plattform Industrie 4.0, 2019. Disponível em: <<https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/vws-in-detail-presentation.html>>. Citado na página 27.

BADER, S.; BARNSTEDT, E.; BEDENBENDER, H.; BILLMANN, M.; BOSS, B.; BRAUNMANDL, A.; CLAUER, E.; DEPPE, T.; DIEDRICH, C.; FLUBACHER, B.; FRITSCHE, W.; GARRELS, K.; GATTERBURG, A. G.; HANKEL, M.; HILLERMEIER, O.; HOFFMEISTER, M.; JOCHEM, M.; KOGAN, Y.; KOZIOLEK, H.; ZIESCHE, C. *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. 27–92 p. Citado 6 vezes nas páginas 14, 27, 28, 29, 47 e 77.

BADER, S.; BEDENBENDER, H.; BILLMANN, M.; BONDZA, A.; BOSS, B.; ERLER, S.; GARRELS, K.; HADLICH, T.; HANKEL, M.; HILLERMEIER, O.; HOFFMEISTER, M.; KIELE-DUNSCHE, M.; NEIDIG, J.; ORZELSKI, A.; POLLMEIER, S.; RAUSCHER, B.; RIEDER, W.; STEIN, S. *Submodel Templates of the Asset Administration Shell.* Plattform Industrie 4.0, 2020. Disponível em:

- <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Submodel_templates-Asset_Administration_Shell-Technical_Data.html>. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 50.
- BALLOU, R. H. *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial*. [S.l.]: Bookman Editora, 2006. Citado na página 29.
- BARRETO, L.; AMARAL, A.; PEREIRA, T. Industry 4.0 implications in logistics: an overview. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 13, p. 1245–1252, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- BEDENBENDER, H.; BILLMANN, M.; EPPLER, U.; HADLICH, T.; HANKEL, M.; HEIDEL, R.; HILLERMEIER, O.; HOFFMEISTER, M.; HUHLE, H.; JOCHUM, M. Examples of the asset administration shell for industrie 4.0 components - basic part. *ZVEI White Paper*, p. 4–9, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 28, 30, 47 e 55.
- BELL, M. Service-oriented modeling. *John Wiley & Sons, Inc*, Wiley Online Library, 2008. Citado na página 36.
- BIBI, F.; GUILLAUME, C.; GONTARD, N.; SORLI, B. A review: Rfid technology having sensing aptitudes for food industry and their contribution to tracking and monitoring of food products. *Trends in Food Science & Technology*, Elsevier, v. 62, p. 91–103, 2017. Citado na página 33.
- BLUME, M.; KOCH, N.; IMTIAZ, J.; FLATT, H.; JASPERNEITE, J.; SCHLEIPEN, M.; SAUER, O.; DOSCH, S. An opc-ua based approach for dynamic-configuration of security credentials and integrating a vendor independent digital product memory. *Jahreskolloquium Kommunikation in Der Automation (KommA 2014)*, 2014. Citado na página 35.
- BOOTH, D.; HAAS, H.; MCCABE, F.; NEWCOMER, E.; CHAMPION, M.; FERRIS, C.; ORCHARD, D. 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. 6–17, 2004. Citado 4 vezes nas páginas 39, 40, 41 e 42.
- 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.n.], 2018. p. 3944–3953. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10125/50383>>. Citado na página 21.
- 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. ISBN 978-1-4577-0830-5. Citado 3 vezes nas páginas 12, 35 e 36.
- CÂNDIDO, G.; JAMMES, F.; BARATA, J.; COLOMBO, A. W. Generic management services for dpws-enabled devices. In: IEEE. *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. [S.l.], 2009. p. 3931–3936. ISBN 978-1-4244-4648-3. Citado na página 37.
- 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 na página 33.

- CORRALES, L. d. C. N.; LAMBÁN, M. P.; KORNER, M. E. H.; ROYO, J. Overall equipment effectiveness: Systematic literature review and overview of different approaches. *Applied Sciences*, v. 10, n. 18, p. 1–11, 2020. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/18/6469>>. Citado na página 51.
- 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 29.
- DORST, W.; GLOHR, C.; DIEGNER, B.; DIEMER, J.; ADOLPHS, P.; BEDENBENDER, H.; JÄNICKE, L.; JOCHEM, M. Implementation strategy industrie 4.0. Bitkom e.V., VDMA e.V., ZVEI e.V., p. 8–69, 2016. Disponível em: <<https://www.zvei.org/en/press-media/publications/implementation-strategy-industrie-40-report-on-the-results-of-industrie-40-platform>>. Citado na página 23.
- DRATH, R.; ALEXANDER, H. Industrie 4.0: hit or hype? *Industrial Electronics Magazine*, v. 8, n. 2, p. 56–58, 2014. Citado na página 23.
- FAN, T.; TAO, F.; DENG, S.; LI, S. Impact of rfid technology on supply chain decisions with inventory inaccuracies. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 159, p. 117–125, 2015. Citado na página 33.
- FATTORI, C. C.; KANO, C. H.; FABRÍCIO, J.; MIYAGI, P. E. *Rede de Petri e o aplicativo Platform Independent Petri net Editor (PIPE)*. 2012. 5–12 p. Citado na página 77.
- FIELDING, R. T. *Architectural styles and the design of network-based software architectures*. University of California, Irvine Irvine, 2000. v. 7. 76–105 p. Disponível em: <<https://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/top.htm>>. Citado 3 vezes nas páginas 40, 41 e 42.
- FRÄMLING, K.; HOLMSTRÖM, J.; LOUKKOLA, J.; NYMAN, J.; KAUSTELL, A. Sustainable plm through intelligent products. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Elsevier, v. 26, n. 2, p. 789–799, 2013. Citado na página 57.
- 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 24, 25, 27 e 28.
- GOSEWEHR, F.; WERMANN, J.; BORSYCH, W.; COLOMBO, A. W. 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 37.
- GOTTSCHALK, K.; GRAHAM, S.; KREGER, H.; SNELL, J. Introduction to web services architecture. *IBM systems Journal*, IBM, v. 41, n. 2, p. 170–177, 2002. Citado na página 38.

- GROBA, C.; BRAUN, I.; SPRINGER, T.; WOLLSCHLAEGER, M. 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 37.
- HAFTOR, D. M.; KAJTAZI, M.; MIRIJAMDOTTER, A. A review of information logistics research publications. In: SPRINGER. *International Conference on Business Information Systems*. [S.l.], 2011. p. 244–255. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 29.
- HANKEL, M.; REXROTH, B. The reference architectural model industrie 4.0 (rami 4.0). *ZVEI*, April, v. 2, n. 2, p. 4–9, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 26.
- HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. In: IEEE. *49th Hawaii International Conference on System Sciences*. [S.l.], 2016. p. 3928–3937. Citado 6 vezes nas páginas 7, 12, 14, 19, 20 e 23.
- HIRSCH-KREINSEN, H.; KUBACH, U.; STARK, R.; WICHERT, G. von; HORNUNG, S.; HUBRECHT, L.; SEDLMEIR, J.; STEGLICH, D. S. 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 na página 16.
- HIRSCH-KREINSEN, H.; KUBACH, U.; STARK, R.; WICHERT, G. von; HORNUNG, S.; HUBRECHT, L.; SEDLMEIR, J.; STEGLICH, D. S. *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 16 e 23.
- HUGOS, M. H. *Essentials of supply chain management*. Fourth edition. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2018. 1–29 p. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- IEC. *Smart manufacturing – Reference architecture model industry 4.0 (RAMI4.0)*. [S.l.]: IEC PAS 63088 - International Electrotechnical Commission, 2017. Citado na página 66.
- 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, p. 2–3, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 19.
- 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*, p. 12–25, 38–62, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 15, 16, 22 e 23.
- 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 39.
- LASI, H.; FETTKE, P.; KEMPER, H.-G.; FELD, T.; HOFFMANN, M. Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, Springer, v. 6, n. 4, p. 239–242, 2014. ISSN 1867-0202. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>>. Citado 6 vezes nas páginas 12, 13, 15, 19, 21 e 22.

- 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 2 vezes nas páginas 30 e 53.
- LEVITT, T. Exploit the product life cycle. *Harvard business review*, v. 43, p. 81–94, 1965. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- LI, Q.; TANG, Q.; CHAN, I.; WEI, H.; PU, Y.; JIANG, H.; LI, J.; ZHOU, J. Smart manufacturing standardization: Architectures, reference models and standards framework. *Computers in Industry*, v. 101, p. 91–106, 2018. ISSN 0166-3615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361517302075>>. Citado na página 14.
- LIU, M. J. *Managing the Marketing Risk*. 2010. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/umiss/mmm2>>. Citado na página 34.
- MIYAGI, P. E. *Controle programável: fundamentos do controle de sistemas a eventos discretos*. [S.l.]: Editora Blucher, 1996. 116–120 p. Citado 3 vezes nas páginas 43, 44 e 45.
- MÜLBERT, A. L.; AYRES, N. M. *Fundamentos para Sistemas de Informação*. 2. ed. [S.l.]: Livro didático da disciplina de Fundamentos para Sistemas de Informação - Universidade do Sul de Santa Catarina, 2005. Citado na página 43.
- NICHOLS, M. R. *The Rise of Manufacturing as a Service*. Online article - BOSS Magazine, 2019. Disponível em: <<https://thebossmagazine.com/manufacturing-as-a-service/>>. Citado na página 40.
- OLIVEIRA, J. B.; LIMA, R. S.; MONTEVECHI, J. A. B. Perspectives and relationships in supply chain simulation: A systematic literature review. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Elsevier, v. 62, p. 166–191, 2016. Citado na página 43.
- 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 15.
- PISCHING, M. A. *Arquitetura para descoberta de equipamentos em processos de manufatura com foco na indústria 4.0*. 60–62 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2018. Citado na página 14.
- PISCHING, M. A.; PESSOA, M. A.; JUNQUEIRA, F.; FILHO, D. J. S.; MIYAGI, P. E. An architecture based on rami 4.0 to discover equipment to process operations required by products. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 125, p. 574–591, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.029>>. Citado na página 44.
- PISCHING, M. A.; PESSOA, M. A.; JUNQUEIRA, F.; MIYAGI, P. E. PfS/pn technique to model industry 4.0 systems based on rami 4.0. In: IEEE. *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. [S.l.], 2018. v. 1, p. 1153–1156. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.
- PORTER, M. E. Competitive advantage: Creating and sustaining superior performance. *Competitive advantage*, v. 167, p. 167–206, 1985. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

- PORTER, M. E.; HEPPELMANN, J. E. How smart, connected products are transforming companies. *Harvard business review*, v. 93, n. 10, p. 96–114, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 59.
- 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 31.
- RüßMANN, M.; LORENZ, M.; GERBERT, P.; WALDNER, M.; JUSTUS, J.; ENGEL, P.; HARNISCH, M. 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 22 e 23.
- SANTOS, J. S.; AZEVEDO, L. G.; SOARES, E.; THIAGO, R.; SILVA, V. T.; SOUZA, R. et al. Analysis of tools for rest contract specification in swagger/openapi. In: *2nd International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS 2020). INSTICC*. [S.l.: s.n.], 2020. Citado na página 42.
- SANTOS, J. S. D.; AZEVEDO, L. G.; SOARES, E. F.; THIAGO, R. M.; SILVA, V. T. da. Analysis of tools for rest contract specification in swagger/openapi. In: *ICEIS (2)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 201–208. Citado na página 42.
- SCHMITTNER, C.; MA, Z.; RUPRECHTER, T.; ALDRIAN, A. 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 21.
- SCHWAB, K. *The fourth industrial revolution*. [S.l.]: Currency - World Economic Forum, 2016. ISBN 978-1-944835-01-9. Citado na página 20.
- SERRANO, N.; HERNANTES, J.; GALLARDO, G. Service-oriented architecture and legacy systems. *IEEE software*, IEEE, v. 31, n. 5, p. 15–19, 2014. Citado na página 41.
- 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 40.
- SQUIT, S. *Orquestração de sistemas produtivos dispersos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2013. P. 1–28. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.
- STARK, J. Product lifecycle management. In: *Product lifecycle management (Volume 1)*. [S.l.]: Springer, 2015. p. 1–29. Citado na página 35.
- STRANDHAGEN, J. O.; VALLANDINGHAM, L. R.; FRAGAPANE, G.; STRANDHAGEN, J. W.; STANGELAND, A. B. H.; SHARMA, N. Logistics 4.0 and emerging sustainable business models. *Advances in Manufacturing*, Springer, v. 5, n. 4, p. 359–369, 2017. Citado na página 33.
- SURANA, A.; KUMARA*, S.; GREAVES, M.; RAGHAVAN, U. N. Supply-chain networks: a complex adaptive systems perspective. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 43, n. 20, p. 4235–4265, 2005. Citado na página 12.

- TORRES, J. R. M.; VARGAS, D. A. O. Collaboration and information sharing in dyadic supply chains: A literature review over the period 2000-2012. *Estudios Gerenciales*, v. 30, n. 133, p. 343–354, 2014. Cited By :55. Disponível em: <www.scopus.com>. Citado na página 49.
- 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 22 e 33.
- VAIDYA, S.; AMBAD, P.; BHOSLE, S. Industry 4.0 - a glimpse. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 20, p. 233–238, 2018. Citado na página 21.
- VLACHOS, I. P. A hierarchical model of the impact of rfid practices on retail supply chain performance. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 41, n. 1, p. 5–15, 2014. Citado na página 33.
- WAHLSTER, W. Digital product memory: Embedded systems keep a diary. *Harting tec. News*, v. 15, p. 7–9, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 12, 14 e 35.
- WAHLSTER, W. Industrie 4.0: Active semantic product memories for smart factories. *IDA 30th Year Celebration Seminar Linköping*, v. 24, 2013. Citado na página 20.
- WAHLSTER, W. *SemProM: Foundations of Semantic Product Memories for the Internet of Things*. [S.l.]: Springer, 2013. 3–23 p. Citado na página 15.
- WEYER, S.; SCHMITT, M.; OHMER, M.; GORECKY, D. 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 15.
- 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 27.
- ZOLL, M.; JÄCK, D.; VOGT, M. W. Evaluation of predictive-maintenance-as-a-service business models in the internet of things. In: IEEE. *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*. [S.l.], 2018. p. 1–9. Citado na página 58.