

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Dissertação de Mestrado

**Arquitetura e Middleware para Integração dos Níveis de
Gerenciamento Industriais Baseado em Sistemas
Ciberfísicos**

Natanael Garcia Rodrigues

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Computação

Orientador: Prof. Dr. Danúbia Bueno Espíndola
Co-orientador: Prof. Dr. Sílvia da Costa Botelho

Rio Grande, 2017

Dados de catalogação na fonte:

colocar NOME DO BIBLIOTECÁRIO – CRB-colocar número do crb do bibliotecário
Biblioteca Central – FURG

A999a Rodrigues, Natanael Garcia

Arquitetura e Middleware para Integração dos Níveis de Gerenciamento Industriais Baseado em Sistemas Ciberfísicos / Natanael Garcia Rodrigues. – Rio Grande, 2017. – 114 f: gráf. – Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande. Centro de Ciências Computacionais. Rio Grande, 2017. – Orientador Danúbia Bueno Espíndola; Co-orientador Sílvia da Costa Botelho.

1. Sistemas Ciberfísicos de Produção. 2. Gerenciamento Industrial. 3. Cadeia de Suprimentos. 4. Interfaces Humano Computador. I. Espíndola, Danúbia Bueno. II. Botelho, Sílvia da Costa. III. Título.

CDD: 999.9

Banca examinadora:

Prof. Dr. Carlos Rodrigues Rocha

Prof. Dr. Eder Mateus Nunes Gonçalves

Prof. Dr. Ricardo Nagel Rodrigues

Dedico este trabalho a minha família, a minha esposa e a todos os amigos que me auxiliaram de alguma forma a alcançar esse objetivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus pela vida, a saúde e a oportunidade de desenvolver minha vida intelectual e acadêmica. A minha família, minha esposa amada, a Sabrina dos Santos Rodrigues e a nossa bebê: a Nathália dos Santos Rodrigues, que acabou de chegar para tornar nossa vida mais feliz e significativa.

Agradeço a minha orientadora, a Prof^a. Dra. Danúbia Bueno Espíndola e co-orientadora, Prof^a. Dra. Sílvia da Costa Botelho pela ajuda e conselhos valiosos em todas as reuniões de orientação e desenvolvimento de projetos. O empenho delas me incentivou durante essa caminhada e enriqueceu minha pesquisa. Levo os seus conselhos e orientações para toda a vida.

Agradeço aos meus amigos e colegas pelo auxílio e por tornar os dias de curso mais alegres. Sem a ajuda deles eu não conseguiria chegar tão longe. As nossas conversas sempre foram muito produtivas, e me motivaram a testar e conhecer novas tecnologias.

Agradeço aos professores do programa de Pós-Graduação em Computação da FURG pelos novos ensinamentos. Por ampliar meu conhecimento e me ajudar a desbravar novas possibilidades e oportunidades.

Agradeço aos professores da banca examinadora por aceitarem o convite e principalmente por dispor de tempo para revisar e fazer sugestões a este trabalho.

Agradeço por fim à Capes e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo apoio financeiro que me permitiu dedicar-me exclusivamente ao desenvolvimento desta pesquisa.

Aplica o teu coração à instrução e os teus ouvidos às palavras do conhecimento.

— PROVÉRBIOS 23:12.

RESUMO

RODRIGUES, Natanael Garcia. **Arquitetura e Middleware para Integração dos Níveis de Gerenciamento Industriais Baseado em Sistemas Ciberfísicos** . 2017. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar um middleware para a integração de sistemas industriais baseada nos conceitos dos sistemas ciberfísicos de produção, contribuindo para a otimização do gerenciamento dos recursos da planta industrial, do processo produtivo e da cadeia de suprimentos. A proposta baseia-se nos conceitos dos sistemas ciberfísicos com a integração entre os elementos do domínio físico, cibernético e humano presentes no ambiente industrial. O intuito é possibilitar a integração de informações dos diferentes níveis de gerenciamento industrial através do desenvolvimento de interfaces de dados e de interações sob o paradigma CPPS, contribuindo para a tomada de decisão em todos os níveis de gestão industrial.

Palavras-chave: Sistemas Ciberfísicos de Produção, Gerenciamento Industrial, Cadeia de Suprimentos, Interfaces Humano Computador.

ABSTRACT

RODRIGUES, Natanael Garcia. **A CPPS Architecture for Integration of Industrial Management Levels**. 2017. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

This work aims to present an middleware for integrating industrial systems based on the concepts of cyber-physical production systems, contributing to the optimization of resource management of the plant, the production process and supply chain. The proposal is based on the concepts of cyber-physical systems with the integration of the elements of physical, cyber and human domain present in the industrial environment. The aim is to enable the integration of information from different levels of industrial management through the development of data interfaces and interactions, contributing to the decision-making.

Keywords: Cyber-Physical Production Systems, Industrial Management, Supply Chain, Human Computer Interfaces.

LISTA DE FIGURAS

1	Evolução do Cenário Industrial - Adaptado de Wahlster, 2013 e DKFI, 2011	20
2	A composição conceitual das fábricas inteligentes - Fonte: W. Wahlster, DKFI, 2014	25
3	Relação entre as fábricas inteligentes e os demais conceitos recorrentes. Fonte: Adaptado de DKFI, 2011	27
4	Pirâmide da Automação - Fonte: Groover, 2010	36
5	Níveis Gerenciais: Perspectiva da Informação - Fonte: Elaborado pelo autor	37
6	Níveis Gerenciais: Perspectiva Humana - Fonte: Elaborado pelo autor	38
7	ERP - Estrutura típica do sistema.	44
8	Integração Vertical - Fonte: Adaptado de (KAGERMANN et al., 2013)	45
9	Integração Horizontal - Adaptado de (KAGERMANN et al., 2013) .	46
10	Decomposição da hierarquia da automação através de serviços distribuídos - (MONOSTORI, 2014).	47
11	Interação entre humanos e máquinas em um sistema ciberfísico - (MONOSTORI, 2014)	51
12	Representação da Aplicação do CPS na Manufatura (CPPS) - Fonte: DFKI, 2012.	51
13	CPS - Publicações acadêmicas dos últimos anos	52
14	Arquitetura de Infraestrutura Orientada a Serviços. Fonte: (COLOMBO; KARNOUSKOS, 2009)	54
15	CPS Baseado em SOA - Fonte: (HU et al., 2012)	54
16	CPS Baseado em SOA - Fonte: (KARNOUSKOS et al., 2012)	55
17	Arquitetura de CPS Baseada em Serviços - Fonte: (YU; JING; LI, 2012)	56
18	Exemplo arquitetura de plataforma CPS - Fonte: (KAGERMANN et al., 2013)	56
19	Arquitetura para sistemas de produção baseada em SOA - Fonte: (BANGEMANN et al., 2014)	57
20	Uma arquitetura para CPS orientada a eventos - Fonte: (LI; WANG; ZHOU, 2014)	58
21	Comparação entre as fábricas de hoje e as fábricas da Indústria 4.0 - Fonte: (LEE; BAGHERI; KAO, 2014)	58
22	Metodologia para o Desenvolvimento de CPS baseado em Sistemas da Indústria 4.0 - Fonte: (LEE; BAGHERI; KAO, 2014)	59

23	Arquitetura baseada no contexto para prover informação e interpretação considerando a localização do usuário humano no ambiente da indústria 4.0 - Fonte: (GORECKY; SCHMITT, 2014)	59
24	Arquitetura 5C para a implementação de sistemas ciberfísicos - Fonte: (LEE; BAGHERI; KAO, 2015)	60
25	EngSB - Integração de Ferramentas de Supervisão e Engenharia - Fonte: (NOVAK; MORDINYI, 2015)	61
26	A visão do CPS: Sistema de Sistemas - Fonte: (CPS PWG, 2015)	62
27	Camadas da Arquitetura do Sistema Ciberfísico de Produção - CPPS	65
28	Domínios do CPPS - Fonte: Elaborado pelo autor	68
29	Processo de Modelagem CPPS	69
30	Modelo Topológico - Perspectiva Física	70
31	Modelo Topológico - Elementos descritos nas especificações do B2MML (Fonte: elaborado pelo autor)	71
32	Modelo Topológico - AutomationML (Fonte: AutomationML Consortium)	71
33	Middleware CPPS - Sistema Integrador de Domínios do CPPS	73
34	Middleware CPPS - Gerenciador de Dispositivos Físicos	75
35	Middleware CPPS - Gerenciador de Comunicação Virtual	76
36	Middleware CPPS - Gerenciador de Comunicação CPS	77
37	Middleware CPPS - Análise de Contexto	78
38	Middleware CPPS - Módulo de Virtualização	79
39	Relacionamento entre o módulo de virtualização e a Base de Conhecimento	82
40	Middleware CPPS - Agente Cognitivo do Módulo de Inteligência	83
41	Principais atividades desenvolvidas no estudo de caso de integração vertical	86
42	Planta Industrial Didática (SMAR)	87
43	Barramento com Equipamentos da Série Nexto (Altus - Sistemas de Automação S.A.)	87
44	Interface do MasterTool IEC (Altus - Sistemas de Automação S.A.)	88
45	Supervísório Blueplant (Altus - Sistemas de Automação S.A.)	88
46	Interface desenvolvida no Blueplant	89
47	Modelo 3D da Planta Didática no Blender	89
48	Modelo 3D da planta industrial apresentado com realidade aumentada	90
49	Displays virtuais apresentando informações no ambiente físico	90
50	Middleware CPPS - Banco de dados: Comunicação com Dispositivos Físicos)	92
51	Middleware CPPS - Banco de dados: Comunicação Virtual)	92
52	Middleware CPPS - Módulo de Comunicação: Comunicação com Dispositivos)	93
53	Middleware CPPS - Módulo de Comunicação: Comunicação com Aplicações)	93
54	Middleware CPPS - Banco de dados: Virtualização	94
55	Arquitetura de Integração Vertical - Camadas	96
56	Áreas temáticas do projeto I2MS2C	98

57	Estudo de Caso 2 - Arquitetura para integração da Cadeia de Supri- mentos de Peças de Reposição	100
58	Interface de Configuração do IMS	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
AI	Artificial Intelligence
AR	Augmented Reality
BI	Business Intelligence
C3	Centro de Ciências Computacionais
CAD	Computer Aided-Design
CAM	Computer Aided-Manufacturing
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CLP	Controlador Lógico Programável
CMMS	Computerized Maintenance Management System
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CPS	Cyber Physical System
CPPS	Cyber Physical Production System
CPSH	Cyber Physical System Human
CRM	Customer Relationship Management
DCS	Distributed Control System
DMDI	Digital Manufacturing and Design Innovation
DSS	Decision Support System
DSS	Decision Support System
EIS	Executive Information System
EPS	Enterprise Execution System
ERP	Enterprise Resource Planner
FMS	Flexible Manufacturing System
FURG	Universidade Federal de Rio Grande
HMI	Human Machine Interface

IA	Inteligência Artificial
ICG	Interactive Computer Graphics
IHM	Interface Humano Máquina
IMS	Intelligent Maintenance System
IMS2SCM	Intelligent Maintenance System to Supply Chain Management
IoT	Internet of Things
JSON	Javascript Object Notation
M2M	Machine to Machine
MAR	Mobile Augmented Reality
MES	Manufacturing Execution System
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MR	Mixed Reality
MRP	Manufacturing Resource Planner
MTU	Master Terminal Unit
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OWL	Web Ontology Language
PCP	Planejamento e Controle da Produção
REST	Representational State Transfer
RTU	Remote Terminal Unit
SaaS	Service as a Service
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SCM	Supply Chain Management
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
SRM	Supplier Relationship Management
SEM	Emergency Management System
SOA	Service Oriented Architecture
SOAP	Simple Object Access Protocol
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TMS	Transport Management System
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VR	Virtual Reality
WMS	Warehouse Management System
XML	eXtensible Markup Language

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contextualização	16
1.2	Motivação	17
1.3	Objetivos	18
1.3.1	Objetivo Geral	18
1.3.2	Objetivos Específicos	19
1.3.3	Organização do Texto	19
2	TECNOLOGIAS E DESAFIOS PARA A INDÚSTRIA 4.0	20
2.1	Evolução do Cenário Industrial	20
2.2	Tecnologias para a Indústria 4.0	23
2.2.1	Sistemas Ciberfísicos (CPS - Cyber Physical Systems)	23
2.2.2	Internet das Coisas (IoT - Internet of Things)	24
2.2.3	Internet dos Serviços (IoS - Internet of Services)	25
2.2.4	Fábrica Inteligente (Smart Factory)	25
2.3	Desafios para a Indústria 4.0	28
2.4	Considerações Finais	31
3	INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS NA MANUFATURA	32
3.1	Arquiteturas de Integração	34
3.2	Níveis de Gerenciamento Industrial	36
3.2.1	Nível 1 - Dispositivos de Campo	38
3.2.2	Nível 2 - Controle	39
3.2.3	Nível 3 - Supervisão	40
3.2.4	Nível 4 - Gerenciamento de Planta	42
3.2.5	Nível 5 - Gerenciamento Empresarial	43
3.3	Integração Vertical	44
3.4	Integração Horizontal	45
3.5	Sistemas Ciberfísicos de Produção	46
3.6	Tecnologias de Integração Horizontal	47
3.7	Tecnologias de Integração Vertical	48
3.8	A Interação Humana	50
3.9	Análise de Trabalhos Relacionados	52
3.10	Considerações	62

4	ARQUITETURA E MIDDLEWARE CPPS	64
4.1	Estrutura da Arquitetura	64
4.2	Camada Cibernética - Modelagem CPPS	67
4.3	Camada Cibernética - Middleware CPPS	73
4.3.1	Módulo de Comunicação	74
4.3.2	Módulo de Sensibilidade ao Contexto	77
4.3.3	Módulo de Virtualização	79
4.3.4	Módulo de Inteligência	81
4.4	Considerações	83
5	ESTUDOS DE CASO: CPPS NA INTEGRAÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL	85
5.1	Estudo de Caso 1 - Integração Vertical	85
5.1.1	O Cenário e Tecnologias	85
5.1.2	Implementação e Configuração do Middleware	90
5.1.3	A Arquitetura Desenvolvida	95
5.1.4	Análise	96
5.2	Estudo de Caso 2 - Integração Horizontal	97
5.2.1	O Cenário e Tecnologias	97
5.2.2	A Arquitetura Desenvolvida	100
5.2.3	Análise	101
5.3	Considerações Finais	102
6	DISCUSSÕES E TRABALHOS FUTUROS	103
6.1	Trabalhos Futuros	105
	REFERÊNCIAS	107

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Desde os primórdios da história da indústria, a constante evolução tecnológica e organizacional resultam no aperfeiçoamento das técnicas, metodologias e equipamentos empregados no ambiente fabril, elevando os níveis de produtividade. Recentemente, os avanços da tecnologia da informação e comunicação, associados ao desenvolvimento científico em diversas áreas ligadas ao setor industrial vem conduzindo a uma nova era de transformações.

Surge o conceito de Indústria 4.0, definido como uma coleção de elementos tecnológicos e de conceitos que culminam na fábrica inteligente, onde estruturas modulares integradas aos sistemas ciberfísicos, combinam elementos do mundo real e virtual para otimizar os processos produtivos (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015).

Os países industrializados como a Alemanha, Estados Unidos, China, França e Inglaterra estão buscando estratégias para a nova geração industrial, visando a permanência e expansão das suas indústrias no mercado internacional (INFOSYS, 2015). A busca por inovações estratégicas também tem ganhado força entre as grandes empresas de automação, tecnologia da informação e serviços, que vêem esse movimento como uma oportunidade de geração de novos modelos de negócios.

As nomenclaturas adotadas são diversas, entre elas tem-se: "Indústria 4.0", "Industrial Internet", "Advanced Manufacturing", "Smart Manufacturing Leadership Coalition", "Intelligent Manufacturing", entre outros. Entretanto, o objetivo é o mesmo: promover a inovação do cenário industrial através de elementos tecnológicos (ISAKSON; DRATH, 2013). Entre os princípios que orientam esses movimentos temos a interoperabilidade, a virtualização, descentralização, a modularidade, a colaboração, a customização, a orientação a serviço, entre outros (VDE, 2014).

Elementos como os sistemas ciberfísicos (CPS - Cyber Physical Systems), a Internet das Coisas e Internet dos Serviços (IoT - Internet of Things, IoS - Internet of Services) são recorrentes nos artigos, conferências e palestras sobre o futuro da indústria, uma vez que existe uma forte relação entre esses termos e suas aplicações na área de manufatura

(PLATTE, 2013; WAHLSTER, 2013; DRATH; HORCH, 2014; KAGERMANN, 2014; SCHLICK et al., 2014).

Os sistemas ciberfísicos são sistemas que monitoram e controlam processos físicos através de redes de sensores e dispositivos inteligentes, utilizando uma espécie de modelo virtual do mundo físico para ampliar a eficácia da tomada de decisão de forma descentralizada. As tecnologias envolvendo sistemas ciberfísicos combinam elementos de computação, comunicação e controle (LEE; SESHIA, 2014). No contexto da manufatura, esses sistemas também podem ser relacionados com sistemas de modelagem, planejamento e previsão (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015; LEE et al., 2015). Dessa forma, expande-se a possibilidade da aplicação das metodologias e tecnologias associadas ao CPS como elemento integrador das informações circulantes tanto no ambiente interno da organização, assim como em toda cadeia produtiva.

Na indústria, o CPS começa a ser utilizado como mecanismo de gerenciamento e controle sobre os dados produzidos em todo processo de manufatura, oriundos de dispositivos como sensores, atuadores, RFID (Radio Frequency Identification). A comunicação M2M (Machine To Machine), interfaces multimodais para a interação humano-computador (com realidade virtual e aumentada) e sistemas de controle dotados de comportamento cognitivo e preditivo, são outras características desses sistemas.

O desenvolvimento de sistemas ciberfísicos no cenário industrial envolve desafios como o desenvolvimento de plantas sustentáveis, que utilizam a manutenção preditiva para otimização de seus processos, gerando produtos personalizados e em pequenas quantidades. Outros desafios são a integração de diferentes aplicações com plataformas distintas assim como a integração de dispositivos inteligentes fazendo uso de comunicação sem fio (ISAKSON; DRATH, 2013).

Esta dissertação investigará o uso de CPS como vertente tecnológica para a Indústria 4.0. Busca-se, além de apropriar-se dos conceitos do CPS no âmbito da indústria, a tradução desses conceitos para a concepção de um middleware capaz de ser aplicado em cenários reais da indústria.

1.2 Motivação

Ao observarmos o ciclo produtivo, podemos identificar cinco etapas características: o design de produto, a construção e montagem, a manutenção e o descarte. Em todas essas etapas do ciclo de vida do produto são utilizados inúmeros recursos (computacionais, humanos, instalações, máquinas e equipamentos) visando o desenvolvimento do processo produtivo.

A otimização da coordenação dos elementos envolvidos nessas etapas pode ser subdividida em dois eixos de análise: a integração vertical e a integração horizontal (VDE, 2014). Entende-se como integração vertical a colaboração entre os recursos dos diferentes

níveis hierárquicos utilizados no âmbito interno das organizações fabris. Ao passo que, a integração horizontal compreende a colaboração entre as diferentes empresas que atuam como parceiros de negócios dentro da cadeia produtiva e de suprimentos (KAGERMANN et al., 2013).

Os aspectos de gestão das organizações industriais são representados pela pirâmide da automação, um modelo hierárquico elaborado na década de 80, que divide o gerenciamento fabril em alguns níveis: dispositivos de campo, controle, supervisão, coordenação de planta e gestão empresarial (GROOVER, 2010). Em cada um desses níveis encontramos diferentes sistemas, dispositivos e pessoas, interagindo e atuando nos diferentes setores ou departamentos da empresa. Entretanto, esses sistemas não atuam de modo sincronizado, o que prejudica a execução de diversas tarefas, como a manutenção, a aquisição e controle de materiais e suprimentos, entre outras.

No âmbito da Indústria 4.0 surgem novos desafios associados a integração vertical e horizontal, como o desenvolvimento de soluções capazes de gerenciar os dispositivos e sistemas presentes para uma maior eficiência operacional. O objetivo desta integração visa reduzir o tempo e custo de operação, ampliando o controle logístico e estratégico da cadeia produtiva e de suprimentos.

Nesse novo cenário, a complexidade das atividades relacionadas ao processo de manufatura deve crescer consideravelmente, uma vez que os produtos podem ser altamente customizados. A estrutura modular da fábrica inteligente vai requisitar colaboradores altamente qualificados, de modo a desempenhar as atividades de manutenção, supervisão e controle, interagindo com o CPS através de interfaces humano-computador.

Supondo a possibilidade de monitoramento e rastreamento dos diferentes recursos, como os insumos, máquinas, os trabalhadores e os componentes digitais que já estão presentes nos níveis estabelecidos pela pirâmide da automação, tem-se como hipótese que os sistemas físicos cibernéticos possam ser o elemento chave na integração desse novo conjunto de entidades decorrentes da Indústria 4.0.

Para tal, o presente trabalho contribui especificamente no sentido de propor um "middleware de integração", baseado nos sistemas ciberfísicos e tecnologias da Indústria 4.0, promovendo o compartilhamento e reaproveitamento de serviços entre dispositivos e aplicações, tanto no sentido vertical como no horizontal.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um Middleware para a integração dos diferentes níveis de gerenciamento industrial, baseada nos conceitos dos Sistemas Ciberfísicos de Produção (CPPS) e sua aplicação em dois estudos de caso associados a integração vertical e horizontal.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Descrever os níveis de gerenciamento industrial no âmbito da Indústria 4.0;
- Descrever as funcionalidades e vantagens dos Sistemas Ciberfísicos de Produção;
- Propor um Middleware CPPS para a integração vertical e horizontal;
- Aplicar o Middleware em dois estudos de caso.

1.3.3 Organização do Texto

- Capítulo 2: Trata do ambiente industrial, a evolução desse cenário, os níveis de gerenciamento e uma breve revisão sobre os sistemas utilizados nesses níveis;
- Capítulo 3: Aborda os conceitos e tecnologias associados a Sistemas Ciberfísicos;
- Capítulo 4: Apresenta a arquitetura e middleware para CPPS para integração entre os níveis de gerenciamento industrial;
- Capítulo 5: Descreve dois estudos de caso onde aplica-se o Middleware à integração vertical e horizontal.
- Capítulo 6: Discute as conclusões e trabalhos futuros.

2 TECNOLOGIAS E DESAFIOS PARA A INDÚSTRIA 4.0

O presente capítulo mostra como o cenário industrial vem se transformando desde a primeira Revolução Industrial. São apresentados alguns dos elementos que caracterizaram cada uma das três revoluções e na sequência os elementos que constituem a indústria do futuro, denominada "Indústria 4.0".

2.1 Evolução do Cenário Industrial

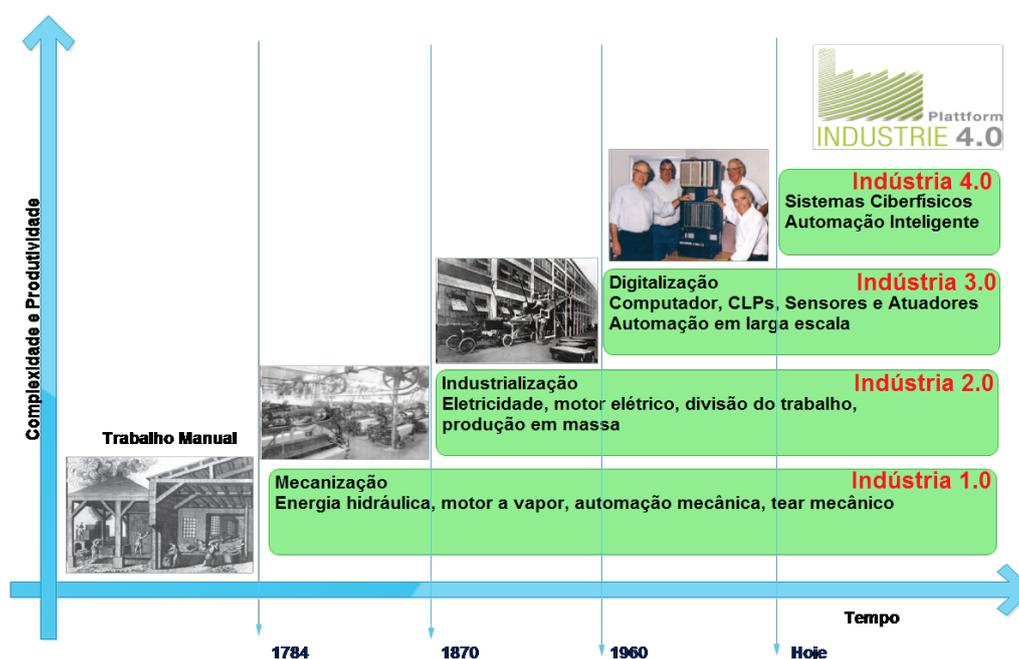


Figura 1: Evolução do Cenário Industrial - Adaptado de Wahlster, 2013 e DKFI, 2011

O cenário industrial passou por grandes transformações ao longo da história, transformações essas que permitiram o aumento da capacidade produtiva, assim como o desenvolvimento de bens e serviços fundamentais para a vida humana nos dias atuais. Isso foi possível através de um conjunto de inovações e desenvolvimento tecnológico dos meios produção, ferramentas e fontes de energia. (STAFF, 2009).

A evolução foi gradual, obtida como resultado da melhoria dos métodos primitivos

de produção e do aperfeiçoamento de máquinas e ferramentas utilizadas na produção artesanal. O aumento da capacidade produtiva de alimentos, roupas e outros produtos manufaturados melhorou as condições de vida, promovendo o crescimento populacional, contribuindo para o desenvolvimento das cidades e a formação dos primeiros mercados consumidores.

A figura 1, apresentada por (WAHLSTER, 2013) sintetiza essa evolução, apresentando as principais contribuições de cada revolução para o desenvolvimento do cenário industrial contemporâneo. A Figura também destaca a crescente capacidade produtiva, de cada momento do cenário industrial, assim como a crescente complexidade da atuação humana no ambiente industrial. A seguir, é descrito como essas transformações ocorreram ao longo do tempo, buscando compreender o momento tecnológico atual e como a tecnologia continua transformando o ambiente industrial.

Indústria 1.0 - Mecanização: antes da primeira Revolução Industrial, a maioria da população atuava predominantemente em atividades rurais. A produção de produtos manufaturados, como roupas e calçados era realizada por artesãos. Esse tipo de produto não era acessível a toda a população, os custos eram elevados e a capacidade de produção era baixa (ALLEN, 2009).

O desenvolvimento tecnológico de máquinas e ferramentas, assim como a exploração de novas fontes de energia foram fundamentais para desencadear as primeiras transformações da indústria. No início a Revolução Industrial foi baseada em pequenas redes de produção que atuavam em domínios geográficos limitados e aos poucos, foram ultrapassando os limites regionais para alcançar níveis nacionais e internacionais (JOVANE et al., 2008).

No início do século XVIII a força hidráulica dos rios constituía uma das principais fontes de energia utilizadas nos diversos moinhos espalhados pela Europa. Em 1775, o motor a vapor criado e aperfeiçoado por James Watt permitiu um grande salto de produtividade, permitindo que as instalações fabris se instalassem no interior do território, mais próximos dos fornecedores de matéria-prima e do mercado consumidor das cidades (KAGERMANN, 2014).

Estava instaurada as primeiras revoluções tecnológicas do cenário industrial baseada na mecanização da produção através da aplicação da força motriz proveniente do motor a vapor, da energia hidráulica e da aplicação do carvão mineral como combustível. Os trabalhadores migraram das fazendas para trabalhar em fábricas, nas primeiras cidades industrializadas.

Indústria 2.0 - Eletrificação e Produção em Massa: a Segunda Revolução Industrial, ocorrida na segunda metade do século XIX foi marcada por uma série de inovações, entre estas a introdução e desenvolvimento da indústria da eletricidade (inventores: George Westinghouse, Nikola Tesla, Thomas Alva Edison) (WRIGLEY, 2010).

Impulsionadas pela iluminação e pelos motores de corrente alternada, as fábricas pas-

saram a trabalhar durante a noite, em turnos. O ponto alto desse momento foi o desenvolvimento do modelo de produção apresentado por Henry Ford nos Estados Unidos. O desenvolvimento das linhas de produção em massa, baseadas na divisão do trabalho e na introdução de correias transportadoras resultaram numa grande expansão em termos de produtividade (DRATH; HORCH, 2014).

Nesse período também surgiram os navios de aço movidos a vapor e o avião, ampliando mais a rede de distribuição. A economia mundial começa a se integrar de forma mais acelerada através das importações e exportações entre diversos países.

Indústria 3.0 - Digitalização: a terceira transformação do cenário industrial está relacionada diretamente com o desenvolvimento da eletrônica e mecatrônica, assim como o controle de processos por computadores e microcontroladores. Essa revolução, também chamada de "Revolução Digital" começou aproximadamente em 1970, com os avanços da eletrônica e tecnologia da informação, desencadeando a automação dos processos de produção (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015).

Durante a primeira e segunda guerras mundiais, diversos equipamentos foram desenvolvidos visando o aparelhamento militar, e de certo modo acabaram contribuindo para o desenvolvimento de diversas tecnologias. No fim da guerra diversos componentes importantes para o desenvolvimento da eletrônica foram surgindo, como o diodo, o transistor e o circuito integrado, desenvolvido pela Texas Instruments Inc, em 1959 (CHANDRAKASAN; BRODERSEN, 2012). Esses componentes permitiram o desenvolvimento das redes de telecomunicação que culminaram no desenvolvimento do microcomputador. Em 1969 a Modicon apresentou o primeiro Controlador Lógico Programável (CLP) que possibilitava a programação digital de sistemas de automação. Os CLPs permitiam o controle de processos centralizado, através de sistemas de supervisão e redes de sensores e atuadores. (DRATH; HORCH, 2014).

A partir desse paradigma, diversos elementos de automação foram sendo incorporados no cenário industrial. Redes de sensores e atuadores coordenadas por CLPs e microcomputadores passaram a automatizar o controle de processos, permitindo o monitoramento e supervisão através da rede industrial, utilizando sistemas de computação. Surgiram protocolos como o MODBUS, PROFIBUS, FIELDBUS, entre outros, com o objetivo de estabelecer a comunicação entre máquinas e os diversos sistemas.

Sistemas de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados (SCADA), os Sistemas de Controle Distribuído (DCS), surgem explorando o uso de redes de sensores e atuadores. Os robôs industriais passaram a executar diversas atividades, contribuindo na ampliação da produção com maior qualidade e eficiência (STOUFFER; FALCO; KENT, 2006).

Indústria 4.0 - Virtualização: a indústria de manufatura global tem enfrentado grandes desafios para promover a performance e a sustentabilidade. A busca por soluções mais eficientes em termos de tecnologias para o gerenciamento da produção é alvo de pesquisas e debates no mundo todo. Países industrializados como a Alemanha e os Esta-

dos Unidos estão caminhando no sentido de promover a evolução tecnológica do cenário industrial (LEE et al., 2015).

Na Alemanha, essa tendência é denominada "Indústria 4.0", e é vista como um sinônimo de transformação das fábricas da atualidade em fábricas inteligentes (*smart factories*), com o desafio de flexibilizar a produção, gerando produtos altamente customizados para competir com o mercado global.

De forma análoga, nos EUA a General Electric promove uma ideia similar denominada "Internet Industrial", definida como a integração de máquinas físicas e dispositivos através de redes de sensores e elementos de software, habilitando o controle e planejamento otimizado. Os elementos chave do conceito são as máquinas inteligentes, a análise avançada de dados e as transformações do ambiente de trabalho, com a adoção de suporte mais inteligente para as operações de manutenção, promovendo qualidade e segurança (EVANS; ANNUNZIATA, 2012).

2.2 Tecnologias para a Indústria 4.0

Como ilustra a figura 2, as tecnologias envolvidas na implantação da Indústria 4.0 são baseadas na Internet das Coisas (IoT) e dos Serviços (Internet of Services) e podem ser agregadas aos sistemas físicos-cibernéticos. A integração e colaboração entre homens, dispositivos e sistemas, através de redes inteligentes permite a evolução dos sistemas de produção, dando origem a fábricas inteligentes.

A seguir apresenta-se os principais conceitos associados a essas tecnologias.

2.2.1 Sistemas Ciberfísicos (CPS - Cyber Physical Systems)

O termo "sistema ciberfísico" surgiu em meados de 2006 na NSF (National Science Foundation) nos Estados Unidos. Em síntese, os CPSs são complexos, multidisciplinares, envolvem a integração física e virtual de componentes e representam um desafio para as engenharias da nova geração. Estes sistemas integram elementos de computação (parte cyber) com fenômenos físicos, isso inclui principalmente a observação ao contexto, a comunicação e aspectos dos sistemas físicos a partir de uma perspectiva multi-disciplinar de controle (PETER, 2014; LEE, 2008).

Os sistemas ciberfísicos são considerados a próxima geração de engenharia de sistemas obtidos por meio de tecnologias de computação, comunicação e controle totalmente integrados (KIM; KUMAR, 2012). São constituídos por redes de dispositivos físicos que atuam de modo distribuído. Esses dispositivos podem ser monitorados e controlados através de protocolos de comunicação. Um modelo de sistema ciberfísico normalmente inclui todos esses três elementos: controle, computação e comunicação (LEE; SESHIA, 2014).

Os CPSs promovem uma intensa colaboração entre elementos do mundo físico e virtual. O potencial do CPS pode mudar vários aspectos da interação homem-máquina,

introduzindo conceitos como os carros autônomos, a robótica colaborativa, construções inteligentes, redes elétricas inteligentes, manufatura inteligente, assim como outras aplicações na medicina, na gestão de recursos ambientais, etc (RAJKUMAR et al., 2010; POOVENDRAN, 2010).

O desenvolvimento de sistemas ciberfísicos no cenário industrial está relacionado a vários desafios, como o desenvolvimento de plantas sustentáveis, que utilizam a manutenção preditiva, otimizam seus processos holisticamente, produzindo produtos personalizados e em pequenas quantidades. Outros desafios, como a integração de diferentes aplicações com plataformas distintas assim como a integração de dispositivos inteligentes, exploram ainda mais a comunicação sem fio (ISAKSON; DRATH, 2013).

Kumar explica que esses sistemas tem suas origens na computação de tempo real (1973) e nos sistemas híbridos (que combinam elementos digitais e analógicos) da década de 1990. Ele destaca que os CPSs utilizam elementos da terceira geração de sistemas de controle com computação embarcada, redes cabeadas e wireless, com o uso intenso de softwares (KUMAR, 2014). O projeto e desenvolvimento de sistemas ciberfísicos envolve áreas da física, matemática, eletrônica, elétrica, comunicação, engenharia de software, entre outras. A modelagem destes sistemas é uma característica crucial da abordagem CPS.

No contexto da Indústria 4.0, os sistemas ciberfísicos podem contribuir diretamente para otimização dos sistemas de manufatura, reduzindo custos através do monitoramento, mapeamento e controle dos recursos disponíveis. Através do CPS os processos produtivos podem ser otimizados, integrando sistemas, dispositivos inteligentes e pessoas.

Entre as possibilidades de aplicação do CPS para a integração vertical do ambiente fabril visando a melhoria de processos, podemos citar a manutenção, a supervisão, a logística, a segurança, a interação humana entre outros. Além dessas aplicações, o CPS também pode contribuir para a integração horizontal, compartilhando e consumindo informações dos parceiros de negócios.

O CPS também pode ser aplicado em sistemas de segurança, controle, medicina, controle de ambientes, aviação, sistemas automotivos avançados, controle de processos, controle de energia, controle de tráfego e uma série de outras aplicações (LEE et al., 2013).

2.2.2 Internet das Coisas (IoT - Internet of Things)

A IoT representa o conjunto de tecnologias capazes de integrar diferentes domínios de elementos, definidos como coisas, permitindo a sua identificação e comunicação através da internet.

É o resultado do progresso tecnológico em vários campos paralelos e frequentemente sobrepostos, onde se incluem os sistemas embarcados, computação ubíqua e pervasiva, dispositivos móveis, telemetria, comunicação M2M, redes de sensores wireless, computação móvel e redes de computadores. De modo geral, a IoT significa que diferentes

domínios de elementos, definidos como coisas, se identificam e comunicam através da internet (FELL, 2014).

2.2.3 Internet dos Serviços (IoS - Internet of Services)

A disponibilidade de serviços através da internet promoveu o grande crescimento das empresas de tecnologia da informação. A IoS habilita a geração de serviços através da internet, através de um modelo de negócio com uma infraestrutura para serviços.

Serviços são oferecidos e combinados para gerar valor em uma rede com vários fornecedores. O crescimento dos serviços pela internet cria novas variações da distribuição de valor para os participantes da cadeia em suas atividades individuais (KAGERMANN et al., 2013).

2.2.4 Fábrica Inteligente (Smart Factory)

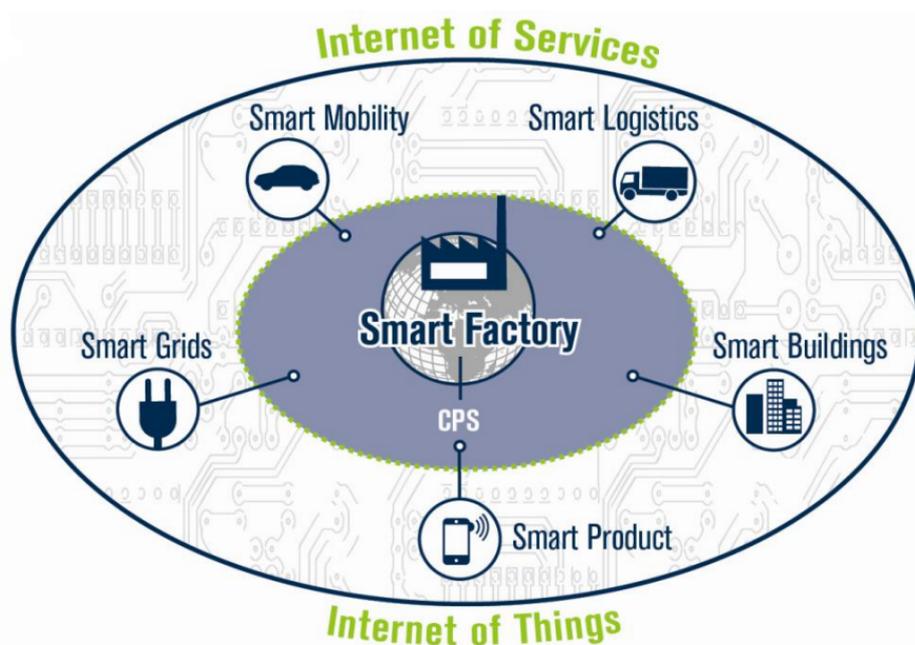


Figura 2: A composição conceitual das fábricas inteligentes - Fonte: W. Wahlster, DKFI, 2014

As tecnologias envolvidas na Fábrica Inteligente (Smart Factory) constituem-se em características chaves da Indústria 4.0 (KAGERMANN et al., 2013). De acordo com a figura 2, a combinação do CPS, IoT e IoS fundamenta a base do desenvolvimento do conceito de fábricas inteligentes. Essas fábricas utilizam massivamente os recursos tecnológicos para promover a eficiência do processo produtivo, agregando valor e reduzindo custos.

A fábrica inteligente é definida como uma fábrica onde pessoas e máquinas interagem e contribuem na execução de suas tarefas. Isso só é possível através tecnologias que ficam trabalhando no plano de fundo, ou seja, sistemas inteligentes que consideram o

contexto, como a posição e o status de um objeto. Esses sistemas são capazes de auxiliar a realização de tarefas baseados na informação proveniente do mundo físico e virtual.

As informações do mundo físico como a posição, ou mesmo a condição de uma ferramenta em contraste com informações virtuais, como documentos eletrônicos, desenhos e modelos de simulação (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015) são um dos desafios dessa indústria. A otimização das linhas de produção, dos processos dependem de como máquinas e equipamentos são capazes de adaptar as condições de produção e se comunicar, independentemente umas das outras por meio de tecnologias de redes sem fio (wireless) (PLATTE, 2013).

A fábrica inteligente é composta pelos seguintes elementos:

- Redes Inteligentes (Smart Grids): redes formadas por dispositivos inteligentes dotados de capacidade computacional e comunicação com sistemas M2M. Smart Grids são sistemas distribuídos compostos por um grande número de componentes heterogêneos. A informação fica disponível ao longo de toda a rede para geração, transmissão, distribuição e reutilização (BUSCHER et al., 2014).
- Tecnologias de Transporte Inteligente (Smart Mobility): veículos inteligentes, consumindo informações em tempo real para a otimização de rotas, compartilhando informações com os demais elementos no decorrer do percurso. Uso inteligente de correias, elevadores e demais dispositivos utilizados na movimentação e localização de produtos inteligentes.
- Construções Inteligentes (Smart Buildings): são instalações e ambientes equipados com dispositivos inteligentes, capazes de promover a eficiência energética, a segurança e saúde das pessoas que frequentam o local.
- Produtos e Serviços Inteligentes (Smart Product, Smart Service): são elementos que apresentam um histórico do ciclo de vida, são identificados e rastreados ao longo do processo de desenvolvimento, sendo capazes de interagir com outros produtos inteligentes de forma autônoma (UCKELMANN, 2008).
- Logística Inteligente (Smart Logistics): o conceito de logística inteligente é baseado nas mesmas condições dos produtos e serviços inteligentes.

Uma relação entre os conceitos de fábricas inteligentes com os demais conceitos recorrentes na literatura está representada na figura 3. A internet das coisas se relaciona com todos esses conceitos, disponibilizando uma grande diversidade de dispositivos para suportar as mais diversas aplicações.

Os sistemas embarcados são utilizados na composição de objetos inteligentes. Uma rede de objetos inteligentes dá origem a uma "smart grid". O CPS é um sistema capaz de

gerenciar e interagir com diversas "smart grids" ao mesmo tempo, gerenciando o processamento distribuído dos diferentes dispositivos inteligentes e demais sistemas integrados. No exemplo da Figura 3, ecossistemas maiores, como as cidades digitais formam ambientes onde diversos CPS podem interagir, gerando novas aplicações e oportunidades de negócios.

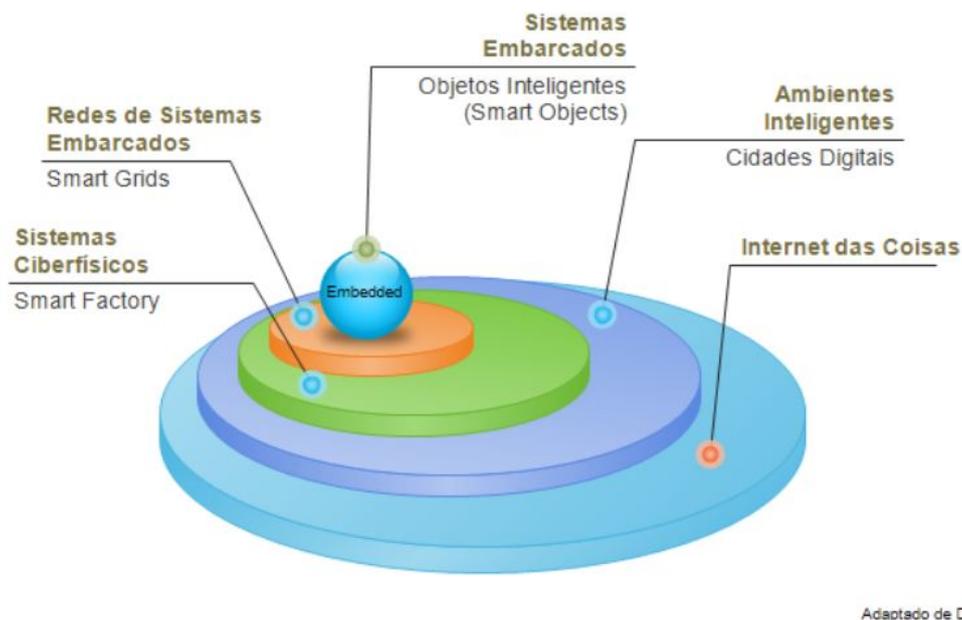


Figura 3: Relação entre as fábricas inteligentes e os demais conceitos recorrentes. Fonte: Adaptado de DFKI, 2011

Além dessas tecnologias elencadas, outras tecnologias também são relacionadas a fábricas inteligentes, como a virtualização, cloud computing, big data e interfaces humano-computador (HCI).

Virtualização: uma cópia virtual dos elementos da fábrica, que reflete nas condições atuais do mundo real através de dados de redes de sensores (WIMMER, 2012). A virtualização permite a realização de simulações para a otimização do processo produtivo.

Cloud Computing: a combinação de IoT e a computação em nuvem permitem a conexão e acesso a diferentes dispositivos, sistemas e serviços através da internet. Os sistemas ciberfísicos podem integrar vários dispositivos, explorando a comunicação, identificação, processamento e outras capacidades proporcionadas pela nuvem (DA XU; HE; LI, 2014).

Big Data: o crescimento e granularidade de dados extraídos pelas redes de sensores e dispositivos IoT no ambiente industrial resulta em grandes volumes de dados. Com isso cresce a importância do uso de tecnologias para armazenar, processar e extrair conhecimento desses dados. Ferramentas, técnicas e algoritmos para mineração de grandes volumes de dados são fundamentais para gerar informações, identificar padrões e ampliar o potencial das diversas aplicações e dispositivos integrados ao CPPS (GÖLZER; CATO;

AMBERG, 2015).

Interfaces Humano-Computador (HCI): com a evolução e inteligência de máquinas e equipamentos mudam as formas de interação homem-computador, com isso, novas interfaces homem-máquina são investigadas para prover tangibilidade e intuitividade na operação desses novos dispositivos.

No que tange aos sistemas ciberfísicos, interfaces mistas através de realidade aumentada e virtualidade aumentada são um importante recurso na operação desses sistemas. Interfaces homem-máquina com recursos de RV que permitam simulação e interatividade também são investigadas para explorar o comportamento dos sistemas ciberfísicos de produção (GORECKY; SCHMITT, 2014).

Robôs, Máquinas e Dispositivos Inteligentes: são componentes autônomos, construídos com tecnologias de computação embarcada, dotados de poder de processamento e controle local, são capazes de se comunicar com outros dispositivos inteligentes como sensores, módulos de produção e produtos através de redes abertas e descrições semânticas (WEYER et al., 2015).

2.3 Desafios para a Indústria 4.0

O objetivo fundamental da Indústria 4.0 é utilizar a evolução das tecnologias apresentadas na seção 2.2 em benefício das empresas de manufatura num futuro próximo (VDE, 2014). Surgem assim alguns desafios a serem tratados, de modo a direcionar as ações nesse sentido. HERMANN; PENTEK; OTTO et al destacam algumas das premissas enunciadas nos trabalhos envolvendo a Indústria 4.0. São elas:

- **Virtualização:** está relacionada com a capacidade do CPS de monitorar e controlar processos físicos, associando esse comportamento com modelos virtuais. Os dados dos sensores são associados com plantas virtuais e modelos de simulação. Assim, uma cópia do mundo físico é criada virtualmente. Em fábricas inteligentes, a planta virtual é utilizada para simular situações reais, permitindo a identificação e correção de falhas nos processos antes que eles sejam realizados no desenvolvimento dos produtos (POSADA et al., 2015). Modelos virtuais também podem ser utilizados para otimizar os parâmetros de produção, detectar falhas e realizar treinamentos e simulações com os colaboradores (SAKAMOTO et al., 2014).
- **Colaboração:** o conceito de colaboração no contexto da Indústria 4.0 é amplo e envolve não apenas a colaboração entre máquinas (M2M - Machine to Machine) e a interação Humano-Computador (HCI - Human Computer e Interaction) mas visa uma maior integração com os parceiros de negócios (fornecedores, distribuidores, revendedores, etc). A integração da cadeia produtiva e de suprimentos é complexo e fundamental para o posicionamento estratégico das organizações industriais (LAI

et al., 2012). A Indústria 4.0 não é apenas uma revolução tecnológica, mas promove mudanças na estrutura organizacional das empresas significativamente (SCHUH et al., 2014).

- **Descentralização:** a grande demanda de produtos personalizados é um desafio para o controle de sistemas centralizados. A computação embarcada permite que sistemas ciberfísicos tomem decisões nesse sentido. Somente em casos de falhas, as atividades são delegadas a níveis mais altos. Isso se faz necessário para garantir a qualidade, possibilitar a rastreabilidade e manter o controle do sistema ao longo do tempo. Fábricas inteligentes utilizam tags, como o RFID para identificar e requisitar às máquinas a realizar uma tarefa de trabalho. Portanto, o controle centralizado passa a não ser mais predominante nessa indústria.
- **Interoperabilidade:** é um dos mais importantes gatilhos da indústria 4.0. Sistemas ciberfísicos e humanos conectados através da IoT e IoS trazem o desafio da interoperabilidade. A padronização é um fator chave para estabelecer a comunicação entre sistemas ciberfísicos de diferentes fabricantes. No contexto da fábrica inteligente, interoperabilidade significa que todos os elementos da planta serão capazes de se comunicar uns com os outros através de redes abertas e descrições semânticas.
- **Sustentabilidade:** esse conceito é baseado em economia, sociedade, ambiente e suas interações. De modo geral, a implementação do desenvolvimento sustentável requer estratégias e monitoramento de um conjunto de indicadores que reflitam as condições atuais, direcionando as ações. As tendências derivadas da análise dos indicadores são utilizadas para definir as políticas e objetivos para o desenvolvimento sustentável (JOVANE et al., 2008). A Indústria 4.0 busca a promoção de um modelo de negócio sustentável e colaborativo, reduzindo os impactos sobre o ambiente através do uso eficiente dos recursos.
- **Customização:** as novas configurações organizacionais, promovidas pelo CPS e pela modularidade tem como desafio permitir a produção customizada na mesma intensidade dos processos de massa. Desse modo, níveis elevados de flexibilização são fundamentais para permitir as mudanças constantes em tempo de produção. Para ganhar vantagem competitiva, num ambiente de negócios caracterizado por rápidas mudanças de requisitos dos clientes e uma forte competitividade, fabricantes devem buscar oferecer produtos e serviços customizados, com preços próximos daqueles produzidos em massa (LAI et al., 2012).
- **Logística 4.0:** nas fábricas inteligentes os produtos são monitorados ao longo do processo produtivo e localizados por tecnologias como o RFID. Dispositivos de transporte inteligente movimentam os produtos com segurança e eficiência, garantindo a excelência logística desde o recebimento da matéria-prima, armazenamento

e distribuição até aos consumidores finais. A colaboração entre os agentes da cadeia produtiva, assim como a integração da cadeia de suprimentos elevam os níveis de produtividade e habilitam a previsibilidade da demanda (HELLINGRATH et al., 2015).

- Trabalho: a adoção cada vez maior de tecnologias de automação, com a implementação de sistemas ciberfísicos pode levar a uma redução de postos de trabalho, especialmente aqueles que envolvem atividades repetitivas, que podem ser automatizadas ou substituídas por novas tecnologias. Ao mesmo tempo, devem surgir novas oportunidades, especialmente nas áreas de TI e de manutenção, onde habilidades e conhecimentos baseados na experiência humana são fundamentais. Surgem também demandas por competências nas áreas de redes e tecnologias de transmissão, pesquisa e desenvolvimento de novos materiais, design de produtos e serviços, assim como o conhecimento combinado de TI, eletrônicos e sistemas mecânicos (DWORSCHAK; ZAISER, 2014).
- Transparência: dado que a adoção de um maior número de dispositivos capazes de extrair dados do ambiente amplia a granularidade e a qualidade da informação sobre a execução dos processos produtivos, isto torna visível e transparente as pequenas falhas que promovem perdas e o uso ineficiente dos recursos.
- Produtividade: fábricas inteligentes são capazes de customizar a produção, gerando produtos com características diferentes na mesma linha de produção, sem que isso represente um nível baixo de produtividade. Diferentemente de uma fábrica tradicional, a fábrica inteligente é capaz de produzir pequenos lotes com preços competitivos, atendendo o mercado local e global.
- Mobilidade: a característica do controle descentralizado associada ao uso de dispositivos móveis e redes wireless garante a mobilidade dos colaboradores ao longo da planta.
- Modularidade: sistemas modulares flexíveis a mudanças podem ser facilmente adaptados ou substituídos permitindo a expansão através da combinação de módulos individuais. Sistemas modulares possibilitam realizar alterações nas características dos produtos desenvolvidos. Fábricas inteligentes utilizam módulos que seguem o princípio Plug & Play (conecte e utilize) (SCHLICK et al., 2014). A padronização de hardware e software deve permitir a identificação automática de módulos, habilitando sua utilização imediata através da Internet dos Serviços (IoS).
- Segurança: a proteção e a segurança são críticas para o sucesso dos sistemas inteligentes de manufatura. É importante assegurar que as instalações de produção e os próprios produtos não representem perigo, tanto para as pessoas como para o meio

ambiente. Ao mesmo tempo, tanto as instalações como os dados e informações devem ser protegidos contra o mau uso e o acesso não autorizado (KAGERMANN et al., 2013).

- **Manutenção Preditiva:** o uso de tecnologias como os Sistemas de Manutenção Inteligente (IMS) ou Manutenção Preditiva possibilitam o monitoramento da saúde dos equipamentos durante o ciclo de vida do produto. A identificação e monitoramento do desgaste dos componentes da planta industrial, permite também um melhor planejamento de produção otimizando as informações de demandas das peças de reposição para a cadeia de suprimentos (ESPINDOLA et al., 2012).
- **Orientação a Serviços:** os serviços oferecidos por diferentes companhias, o CPS e os humanos devem estar disponíveis através da Internet dos Serviços (IoS), de modo que possam ser reutilizadas por outros participantes da rede. Esses recursos podem ser oferecidos internamente ou mesmo ultrapassando as fronteiras da empresa (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015). Fornecedores e fabricantes podem disponibilizar serviços para concretizar compras, vendas, consultar estoques e informar a disponibilidade de recursos, acelerando processos logísticos entre os parceiros de negócios. A fábrica inteligente é baseada na arquitetura orientada a serviços. As funcionalidades do CPS são encapsuladas e disponibilizadas através de web services (SMART FACTORY, 2014).

2.4 Considerações Finais

Nesse capítulo foi apresentada uma breve síntese da evolução do cenário industrial, assim como foram descritos os conceitos, tecnologias e desafios da Indústria 4.0.

Entre as tecnologias relacionadas tem-se os CPS, a IoT, a IoS, a fábrica inteligente, a smart grid, a virtualização, cloud computing e big data. Também foram mencionadas as interfaces multimodais, assim como os robôs e dispositivos inteligentes.

Alguns dos desafios para a implementação da Indústria 4.0 como a virtualização, a colaboração, a descentralização, interoperabilidade, sustentabilidade, a customização, o trabalho e logística foram brevemente descritas no capítulo. Também mencionou-se a transparência, a produtividade, a mobilidade, a modularidade, assim como a segurança, a manutenção preditiva e a orientação a serviços.

Com vista a tratar um dos principais desafios associados a implementação efetiva da Indústria 4.0: "a integração de sistemas", foco deste estudo, o próximo capítulo apresenta uma visão geral dos principais paradigmas para a integração de sistemas industriais.

3 INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS NA MANUFATURA

A integração de sistemas heterogêneos é um dos desafios citados na seção anterior. A diversidade de fabricantes e soluções, com diferentes abordagens e plataformas tecnológicas contribui para o aumento da complexidade da integração de sistemas (ESPÍNDOLA et al., 2013).

O cenário industrial atual requer uma maior flexibilidade dos sistemas de produção e processos, de modo a lidar com a crescente demanda por competitividade e complexidade dos produtos e das cadeias de fornecimento. A efetividade destas questões dependem fundamentalmente da integração do nível de produção com o nível de planejamento (integração vertical), e da integração com clientes e fornecedores (integração horizontal). Assim, a execução dos processos produtivos depende da eficiente integração dos níveis horizontal e vertical (FALLERA; FELDMÜLLERA, 2015).

A competitividade das organizações no ambiente de negócios atual depende diretamente da qualidade do acesso às informações que a empresa manipula rotineiramente. A tarefa de proporcionar acesso a essas informações tem se mostrado árdua, dada a presença de fontes de dados altamente distribuídas e grandes volumes de informação. O acesso a informação relevante torna-se cada vez mais complexo (ALMEIDA; BAX, 2012).

Ao longo das últimas décadas, diferentes paradigmas vem sendo adotados na tentativa de promover a integração entre diferentes sistemas. Entre esses, temos a integração orientada por dados, por processos e mais recentemente, por serviços. Esse último paradigma vem sendo muito citado tanto em trabalhos sobre a Indústria 4.0, como em projetos de IoT, e constitui a base para o conceito de Internet dos Serviços (KAGERMANN et al., 2013; KIRKHAM et al., 2008; JURIC, 2007; JUNG et al., 2013).

Dentre os diferentes paradigmas existentes que regem a integração pode-se destacar os seguintes:

- **Orientação a Dados (Data Driven):** a integração orientada a dados é o paradigma que visa relacionar dados dos diferentes sistemas de modo a gerar um conjunto de novas informações. Entretanto, a integração de sistemas dirigida a dados não é muito flexível. As alterações são realizadas através de mudanças no código das aplicações integradas, o que torna a tarefa complexa na medida em que as apli-

cações evoluem. A integração de dados foi muito discutida com o surgimento do paradigma CIM (Manufatura Integrada por Computador) na década de 80. Com o passar dos anos verificou-se que a simples integração de dados não era suficiente para promover as transformações necessárias no cenário industrial, mas representava um passo importante nesse sentido.

- **Orientação a Processos (Process Driven):** a orientação por processos é um paradigma que consiste no mapeamento das atividades que constituem os processos de negócio de uma organização. Uma vez mapeados, os processos podem ser implementados por meio de uma metodologia como o Desenvolvimento Orientado por Processos (PDD - Process Driven Development). As empresas podem possuir processos semelhantes, no entanto o software pode ser implementado de modo diferente com tecnologias diferentes o que dificulta a integração e o reaproveitamento de processos.
- **Orientação a Serviços (Service Driven):** o paradigma de orientação a serviços vem sendo utilizado nos últimos anos, e reside na transformação de soluções de software em serviços interoperáveis. O software passa a ser visto como um serviço que pode ser invocado através da rede na medida em que vai sendo utilizado. Essa abordagem é muito difundida através de tecnologias da internet. O reaproveitamento de soluções tem motivado a adoção de arquiteturas mais flexíveis, como o paradigma SOA (Service Oriented Architecture) que possibilita o uso do software como um serviço interoperável, que pode ser compartilhado e reaproveitado por diferentes aplicações.

Além dos paradigmas associados a característica dos elementos integrados, surgem também diferentes níveis de integração de sistemas (HOBDDAY; DAVIES; PRENCIPE, 2005), sendo eles:

- **Integração de Componentes do Sistema:** apenas partes do sistema com funcionalidades específicas são compartilhadas.
- **Integração de Plataformas:** uma plataforma pode ser comparada com uma categoria de sistemas (sistemas de supervisão industrial, sistemas de gerenciamento da manutenção, etc), ou mesmo um ambiente específico que suporta diversos sistemas, como ocorre com os sistemas operacionais (Windows, Linux, etc).
- **Arquiteturas de Integração de Sistemas:** são definições conceituais ou estratégicas que possibilitam a comunicação de diferentes sistemas ou o desenvolvimento de interfaces de interação.

- **Integração Semântica:** visa a integração de dados para uma síntese semântica, através de ontologias, possibilitando a geração de conhecimento e a realização de inferências sobre os dados. Uma ontologia é uma representação formal do conhecimento, que fornece uma especificação de um conjunto de conceitos e termos compartilhados num determinado domínio do conhecimento (SHVAIKO; EUZENAT, 2013; GRUBER, 1993). Existem várias vantagens relacionadas a aplicações de ontologias, no entanto, a construção de ontologias não é uma tarefa trivial, e requer pessoas especializadas na área, como é o caso dos engenheiros de ontologias. Esses engenheiros projetam ontologias mapeando o conhecimento de especialistas para a formalização de conceitos sobre determinados domínios do conhecimento.
- **Integração de Sistemas Gerenciais:** é a exploração de técnicas que possibilitem diferentes sistemas compartilharem dados ou operações gerenciais.
- **Integração de Sistemas de Controle:** integração de sistemas que atuam sobre o ambiente físico, controlando máquinas e dispositivos que executam os processos físicos sobre os materiais ao longo da planta industrial.
- **Integração Humana:** o homem é visto como um importante recurso para o desenvolvimento das atividades produtivas. Ele atua em todos os níveis da fábrica, desenvolvendo atividades cada vez mais complexas. A integração humana diz respeito ao desenvolvimento de novas tecnologias e interfaces que ampliem a interação entre pessoas e máquinas, facilitando o desenvolvimento das atividades realizadas predominantemente por agentes humanos, como a manutenção, a supervisão e a administração de recursos.

Segundo Pokraev, interoperar, no contexto da integração de sistemas pode ser considerado a habilidade dos sistemas interagirem entre si (utilizando serviços uns dos outros), visando atingir um determinado objetivo, sem que eles conheçam informações específicas uns dos outros (POKRAEV, 2009).

3.1 Arquiteturas de Integração

Existem diversas estratégias de integração de sistemas. O desenvolvimento de abordagens de integração pode requerer a combinação dessas estratégias, dependendo das plataformas e peculiaridades que cada sistema pode apresentar. As estratégias existentes geralmente adotam algum modelo de referência, ou combinam padrões como as arquiteturas apresentadas a seguir.

- **Portais de Informação (Information Portals):** portais de informação reúnem informações de múltiplas fontes de dados em um único ambiente unificado, tipicamente

numa intranet, de modo que o usuário não tenha que acessar diferentes sistemas individualmente.

- **Replicação de Dados (Data Replication):** muitos processos e transações podem requerer acesso aos mesmos dados, embora seja comum que esses dados sejam replicados ou armazenados em diferentes bancos de dados. A replicação de dados é necessária para que os demais bancos também sejam atualizados.
- **Funções de Negócio Compartilhadas (Shared Business Functions):** uma arquitetura de funções compartilhadas de negócios visa identificar e projetar sistemas que possuem interfaces que podem ser invocadas por outros sistemas, como procedimentos ou serviços de software.
- **Arquitetura Orientada a Serviços (Service-Oriented Architecture):** a Arquitetura Orientada a Serviços (SOA) no contexto da integração de sistemas, visa tirar proveito de funcionalidades novas ou já existentes e assim reutilizar as funções de negócio. É um paradigma para a realização e manutenção de processos de negócios através de sistemas distribuídos. A SOA é baseada em três conceitos principais: serviços, interoperabilidade através de um barramento empresarial de serviços e acoplamento flexível (JOSUTTIS, 2007). A arquitetura orientada a serviços é um paradigma que possui potencial de interoperabilidade. Através da abstração do hardware real e da informação que direciona a interação, concentra-se na informação disponível através de serviços. Esses serviços, podem ser descobertos de forma dinâmica, combinados e integrados em aplicações mash-up (KARNOUSKOS; COLOMBO, 2011).
- **Barramento de Serviços Empresariais (Enterprise Service Bus):** é uma nova abordagem para a integração que combina o uso de mensagens, web services, conversão de dados e roteamento inteligente para permitir a conexão e coordenação das interações de várias aplicações através de uma rede distribuída.
- **Processos de Negócios Distribuídos (Distributed Business Processes):** a arquitetura de processos de negócios distribuídos é uma alternativa ao SOA, e envolve a execução de processos que pertencem a diferentes aplicações.
- **Integração Direta de Negócios (Business-to-Business Direct Integration):** é uma abordagem que considera a integração de sistemas entre diferentes empresas parceiras de negócio. Dada a crescente horizontalização e colaboração entre empresas, esse tipo de cenário tem se tornado comum, pois as empresas cada vez mais realizam transações eletronicamente.

3.2 Níveis de Gerenciamento Industrial

O gerenciamento dos recursos de uma planta industrial automatizada, caracterizada pela presença de equipamentos de instrumentação (como os sensores, atuadores, entre outros) ocorre através de um modelo hierárquico, que estabelece níveis de organização e gestão. Esse modelo também é conhecido como a pirâmide da automação, e estabelece níveis que reduzem a complexidade de coordenação e gerenciamento dos recursos da planta.

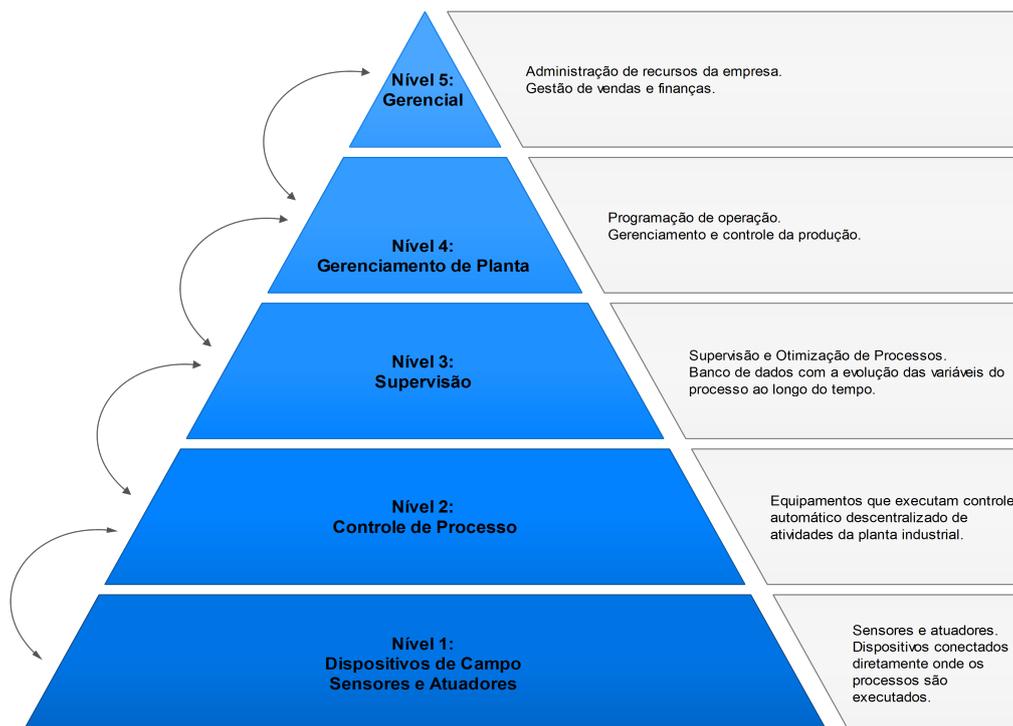


Figura 4: Pirâmide da Automação - Fonte: Groover, 2010

Existem diferentes versões da pirâmide da automação, variando de três a seis níveis. Uma versão com cinco níveis de gerenciamento foi apresentada por Groover na década de 1980 (GROOVER JR, 1980), representada na figura 4. Essa pirâmide divide a complexidade e as responsabilidades de gerenciamento em cinco camadas, nas quais são dispostos os recursos da planta tais como: os dispositivos de campo, o controle de processo, a supervisão, o gerenciamento de planta e o nível gerencial.

Os níveis da pirâmide de Groover são os mesmos definidos pelo modelo definido pela ANSI/ISA-95 e pela IEC 62264, desenvolvido pela International Society of Automation como uma diretriz para o desenvolvimento de interfaces entre a empresa e os sistemas de controle. O ISA-95 é uma terminologia padrão que serve para simplificar a troca de informações, estabelecendo níveis de gerenciamento. Estes níveis são explorados ao longo desse trabalho.

Essa pirâmide pode ser analisada por diferentes perspectivas, pois ela estabelece um padrão hierárquico geral para as relações entre pessoas, máquinas e equipamentos que

constituem a planta industrial em cada um dos seus níveis.

- **Perspectiva da Informação:** podemos observar que o fluxo de dados e informações que orientam as decisões se inicia na camada dos dispositivos de campo, onde ocorre a leitura de sinais digitais e analógicos através de sensores. No segundo nível, esses sinais se transformam em dados de um determinado processo. Já no terceiro nível, o nível de supervisão, esses dados são agrupados e passam a descrever um conjunto de processos. No quarto nível, os dados são agrupados novamente, refletindo no desempenho da planta como um todo. No quinto nível, com a venda dos produtos, os resultados das operações da planta são convertidas em operações de negócios.

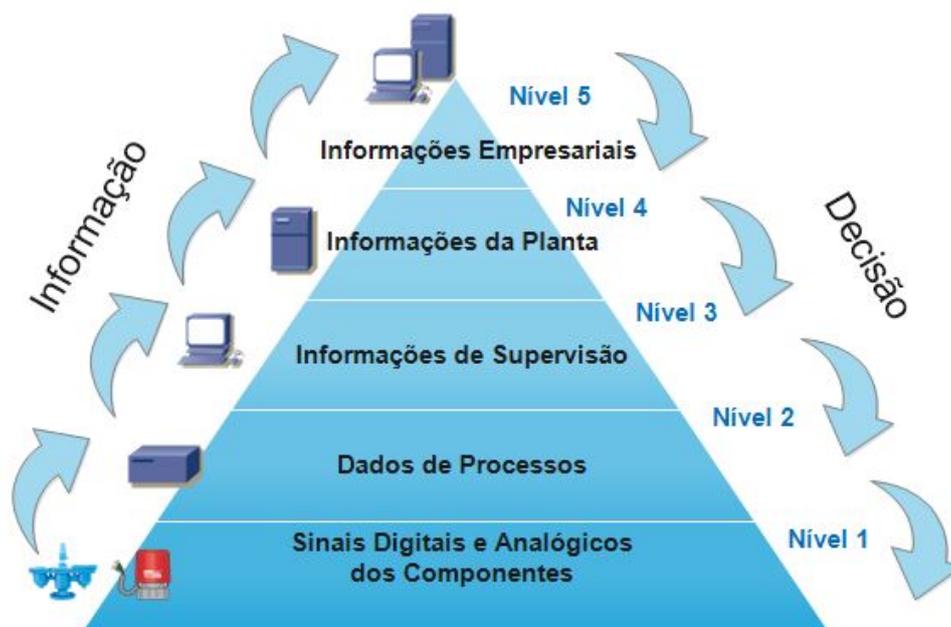


Figura 5: Níveis Gerenciais: Perspectiva da Informação - Fonte: Elaborado pelo autor

- **Perspectiva da Decisão:** as decisões são tomadas com base na estratégia de negócio da empresa definida no nível gerencial. Elas são repassadas para os níveis inferiores, de modo a orientar as atividades para o cumprimento dessa estratégia. O fluxo da informação é contrário ao fluxo da decisão.
- **Perspectiva Temporal:** nos níveis inferiores (1, 2 e 3) a informação utilizada geralmente necessita de tempo real. No nível 3, o monitoramento é realizado em tempo real, mas a aquisição de dados ocorre em períodos de minutos ou horas, dependendo das necessidades e particularidades dos processos monitorados. No nível 4, as grandezas temporais mais utilizadas são de dias e semanas. Já no nível gerencial podem envolver dias, semanas, meses e anos.

- **Perspectiva Humana:** dentro de cada nível existem pessoas com diferentes especialidades. Essas pessoas geralmente atuam com base no modelo hierárquico.

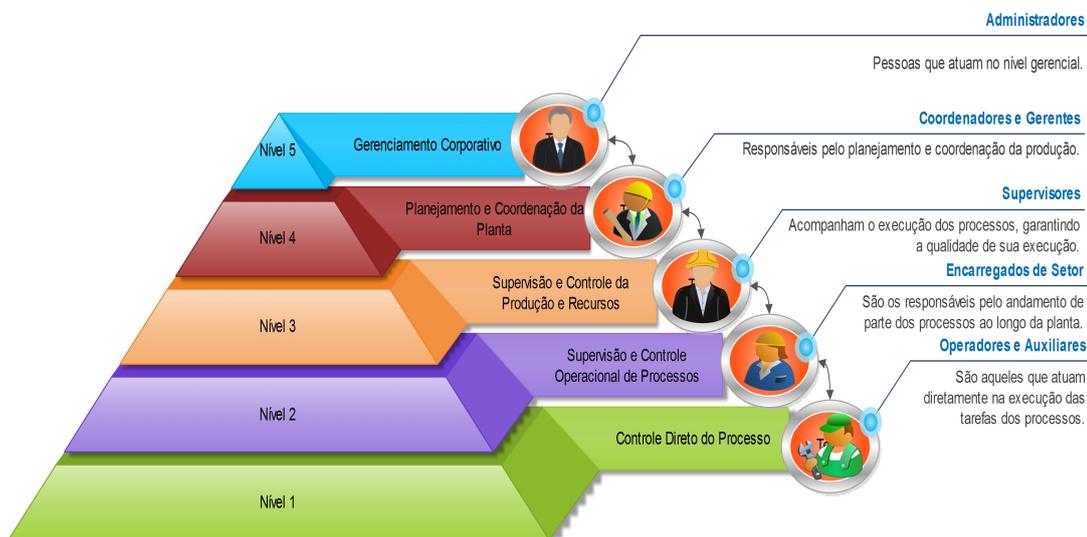


Figura 6: Níveis Gerenciais: Perspectiva Humana - Fonte: Elaborado pelo autor

- **Perspectiva de Comunicação:** existem diferentes protocolos e meios físicos de comunicação utilizados nos níveis gerenciais. Nos níveis 3, 4 e 5 é utilizado o padrão ethernet, sob o protocolo TPC/IP predominantemente. Já em níveis mais baixos, são utilizados diferentes protocolos, padrões de conexão e dispositivos específicos das redes industriais. Os dispositivos de campo utilizam protocolos como o Fieldbus, Modbus, Profibus e DeviceNet em barramentos de comunicação serial, como o RS232 e RS485. Algumas empresas se reuniram, desde 1995 com o objetivo de desenvolver um padrão para acesso a dados em tempo real, conhecido como o padrão OPC, gerenciado pela OPC Foundation. Esse padrão estabelece regras para o desenvolvimento de interfaces de comunicação dos dispositivos de campo com sistemas de monitoramento, supervisão e gerenciamento (SCADA, MES, ERP, etc). Alguns dispositivos da IoT suportam o protocolo OPC e podem ser utilizados em aplicações industriais. Entretanto, na IoT não existe um único protocolo padrão, mas existem vários novos protocolos como o XMMP, MQTT, COAP, AMQP, entre outros que podem ser empregados dependendo da aplicação ou dispositivo utilizado.

3.2.1 Nível 1 - Dispositivos de Campo

Os dispositivos de campo formam a primeira camada de gerenciamento da planta industrial. Do ponto de vista da gestão, essa camada é formada por todos os dispositivos, máquinas e equipamento que compõem o chão de fábrica.

Sob a perspectiva da automação, nesse nível também estão alocados os sensores e atuadores, que são os dispositivos que extraem dados do ambiente e permitem a intervenção no processo produtivo, respectivamente. Distribuídos pela planta industrial através de uma rede, os sensores possibilitam o monitoramento do comportamento das variáveis que compõe o processo industrial. O desenvolvimento de sensores e atuadores wireless (sem fio), vem ganhando espaço nas aplicações industriais, possibilitando através de uma rápida instalação a expansão da rede e provendo uma maior aquisição de dados.

3.2.2 Nível 2 - Controle

A segunda camada é denominada camada de controle, através da qual são realizadas as operações de controle dos processos de transformação da matéria-prima para produção.

Sob a análise da administração, esse nível é o nível de controle operacional, onde os processos são executados através das células de produção, especializados por parte das atividades que vão dar origem ao produto acabado.

Nesse nível, encontramos componentes como os CLPs, microcomputadores ou microcontroladores que recebem e enviam as informações entre os dispositivos de campo e camada de supervisão.

Nesse nível são encontrados os seguintes equipamentos e sistemas:

- Sensores: equipamentos utilizados para extrair dados do ambiente através de técnicas de processamento de sinais (digitais e analógicos);
- Atuadores: equipamentos capazes permitir a intervenção sobre os processos, através do acionamento de válvulas, motores, etc.
- CLP ou PLC (Programmable Logic Controller) : o Controlador Lógico Programável é um dispositivo de hardware que possui um conjunto de portas de entrada e saída, onde são conectados sensores e atuadores. Esse dispositivo possui capacidade de processamento e comunicação em rede e é controlado por uma camada de software que permite a programação de instruções utilizadas no controle de processos. O CLP é o responsável pelo controle da grande maioria dos dispositivos de plantas fixas e flexíveis, podendo ser utilizado em projetos simples de automação, até controles complexos, gerenciados por sistemas SCADA e DCS.
- CAM(Computer Aided-Manufacturing): o Sistema CAM ou Sistema de Manufatura Auxiliada por Computador é um sistema com papel significativo no desenvolvimento de produtos usinados, auxiliando no planejamento, modelagem e processo de fabricação.

O CAM trabalha utilizando os modelos matemáticos provenientes da modelagem em sistemas CAD e possibilita a execução desses modelos em máquinas CNC.

Usando esses sistemas, engenheiros de manufatura podem especificar o tipo de máquina, as configurações e operações, assim como as superfícies a serem usinadas, com as devidas coordenadas de usinagem, as ferramentas e os parâmetros de corte correspondentes (AHN et al., 2001).

3.2.3 Nível 3 - Supervisão

A camada de supervisão é a responsável pelo monitoramento das variáveis dos processos desenvolvidos nos diversos setores da indústria, possibilitando a otimização da execução dos processos produtivos.

Entre as ferramentas aplicadas nesse nível encontram-se os sistemas supervisórios como o Sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition - Sistemas de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados) e o Sistema DCS (Distributed Control System, Sistema de Controle Distribuído), adquirindo dados e permitindo o controle de processos em tempo real, através da rede industrial.

A atividade de supervisão visa identificar erros e falhas que podem comprometer ou afetar a qualidade dos produtos. Os sistemas supervisórios apontam essas falhas através de alarmes, permitindo o ajuste contínuo das variáveis dos processos através da comunicação com os elementos de controle e dispositivos de campo.

Recentemente, significativos avanços da inteligência artificial (IA) e o aprendizado de máquina contribuíram para o desenvolvimento de Sistemas Inteligentes de Manutenção (IMS - Intelligent Maintenance Systems) que permitem o monitoramento do desgaste de peças e equipamentos através da execução de algoritmos avançados (MOREL; VALCKE-NAERS; FAURE, 2007; MONOSTORI, 2014; LEE et al., 2013).

Esses sistemas também estão alocados no nível de supervisão, no entanto, o foco é o gerenciamento dos equipamentos. Através da manutenção preditiva, a identificação antecipada de falhas, permite a realização de uma programação de manutenção otimizada e resulta na redução de paradas na produção.

- SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition): O Sistema de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados é um sistema muito utilizado no controle e supervisão de diversos dispositivos distribuídos, onde a aquisição de dados centralizada é um fator importante para a realização do controle de processos (DANEELS; SALTER, 1999).

O sistema SCADA é composto por um conjunto de hardware e software. O hardware típico inclui um dispositivo mestre (MTU - Master Terminal Unit) atuando como um controle central, equipamentos de comunicação (conexão de rede, cabos, linha telefônica, ou satélite), e uma ou mais unidades terminais remotas (RTU - Remote Terminal Unit) ou controladores lógicos programáveis (CLP ou PLC - Programmable Logic Controller) distribuídos geograficamente. O MTU registra e

processa informação proveniente das entradas e saídas dos RTUs, enquanto o RTU e os CLPs controlam os processos locais (STOUFFER; FALCO; KENT, 2006).

Através de um conjunto de sensores, atuadores e microcontroladores conectados na rede industrial, o sistema SCADA possibilita o monitoramento de processos em tempo real, assim como a representação desses em interfaces humano-máquina (IHM). Essas interfaces são compostas por elementos gráficos e permitem uma rápida compreensão sobre os status dos processos.

O sistema também possibilita a geração de alarmes e relatórios. Os alarmes são gerados em função de alterações indesejadas nos parâmetros das variáveis monitoradas, permitindo a intervenção sobre os processos e a prevenção de situações que podem trazer perigo para os operadores.

A aplicação do sistema SCADA é ampla e possibilita a otimização da execução dos processos produtivos através do monitoramento e controle de processos em tempo real.

- SDCD ou DCS (Distributed Control System): O Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD) ou DCS é utilizado para controle de processos contínuos com muitas malhas de controle PID em diferentes localizações geográficas, como refinarias de óleo e gás, estações de tratamento de água, plantas de geração de energia, plantas de produção química ou fábricas de processamento farmacêutico. Um DCS usa uma malha de controle de supervisão centralizada para mediar um grupo de controladores distribuídos, que partilham tarefas globais de realização de todo um processo de produção (STOUFFER; FALCO; KENT, 2006).
- IMS (Intelligent Maintenance System): O IMS ou Sistema Inteligente de Manutenção é baseado na abordagem de manutenção baseada em condição (CBM - Condition Based Maintenance) que envolve o monitoramento do equipamento utilizando sensores que medem variáveis como a vibração, ruído, consumo de energia, torque e etc, associando com a performance. Essas informações são utilizadas para prever o estado de degradação dos componentes ao longo do ciclo de vida do equipamento, otimizando a programação da manutenção (ZUCCOLOTTO et al., 2013).

Um exemplo desse tipo de sistema, é o Watchdog Agent, ou cão de guarda, desenvolvido por (DJURDJANOVIC; LEE; NI, 2003) que serve para avaliar as condições de trabalho do equipamento, prevendo o tempo de falha e quais peças devem ser substituídas. O Watchdog é formado por um conjunto de algoritmos de processamento de sinais que permitem a realização de extração de características e o monitoramento da saúde do equipamento.

3.2.4 Nível 4 - Gerenciamento de Planta

O gerenciamento de planta corresponde ao nível de coordenação e controle da produção como um todo. A gestão dos recursos, o gerenciamento logístico interno e o controle dos níveis de estoque também estão entre as atividades desse nível de gerenciamento.

As atividades de coordenação da produção devem garantir o nível de produtividade adequado, de acordo com as metas estabelecidas na estratégia de negócio elaborada pela administração no nível gerencial. O alinhamento entre as atividades do gerenciamento de planta e o nível gerencial é fundamental para o posicionamento estratégico da organização.

Nesse nível são aplicadas ferramentas como os Sistemas de Execução da Manufatura - MES (Manufacturing Execution System), que permitem a integração das ações definidas no plano estratégico através da coordenação da execução da produção.

O gerenciamento da planta precisa garantir o ritmo de produção adequado, com os níveis de qualidade esperados, a fim de que os contratos previstos sejam cumpridos com sucesso. Atrasos e paradas na produção geram despesas adicionais e impedem o crescimento empresarial, prejudicando a imagem da empresa como um agente de negócios.

- MES: O MES (Manufacturing Execution System) ou Sistema de Execução da Manufatura surgiu da necessidade de integração de informações entre o sistema corporativo e os sistemas de automação aplicados no chão de fábrica. O objetivo desse tipo de sistema consiste na promoção da automação dos processos de negócio ao invés da simples automação de processos e equipamentos.

Desse princípio nascem os processos de gerenciamento da produção, ou EPS (Enterprise Execution Systems), os sistemas de gerenciamento dos processos produtivos. Esse tipo de sistema vem ganhando popularidade, permitindo o alinhamento das estratégias de negócio definidas pela gerência com a execução das operações no ambiente fabril.

- PCP (Planejamento e Controle da Produção): O PCP é um sistema equivalente ao sistema MES. A sigla PCP geralmente é utilizada para denominar o departamento responsável pelo planejamento e controle de produção. No entanto, algumas fábricas de software de sistemas ERP utilizam essa nomenclatura para nomear o módulo onde as rotinas de produção são implementadas. Um bom sistema PCP otimiza o uso de recursos produtivos, proporcionando fluidez à produção e auxiliando a manter a eficiência em níveis elevados (SALOMON et al., 2002).
- CMMS (Computerized Maintenance Management System): o sistema computadorizado de gerenciamento da manutenção é o sistema responsável por registrar todas as operações de manutenção. Essas informações são reaproveitadas para criar pla-

nos de manutenção, identificar problemas recorrentes e registrar um histórico de soluções aplicadas.

O CMMS permite o armazenamento e análise das informações de manutenção dos equipamentos utilizados na planta, como as trocas de peças e suprimentos necessários (SWANSON, 1997).

- APS (Advanced Planning and Scheduling): o sistema avançado de planejamento e programação é um sistema de processamento para o gerenciamento de regras de nivelamento da produção. Estas regras buscam maximizar a utilização dos recursos de manufatura, especialmente onde existem restrições, tais como: materiais, mão-de-obra e capacidade de equipamentos (BOWERSOX et al., 2013).

3.2.5 Nível 5 - Gerenciamento Empresarial

Esse nível compreende os relacionamentos e operações da organização enquanto empresa. O gerenciamento de suas ações no meio empresarial como as atividades de vendas, prestação de serviços, as aquisições de materiais, bens e matéria-prima, assim como o gerenciamento dos agentes internos e os parceiros de negócio.

O Sistema Integrado de Gestão (ERP - Enterprise Resource Planner) é uma das ferramentas computacionais mais empregadas no gerenciamento corporativo, fornecendo diversas informações através da utilização de um banco de dados corporativo.

Outras ferramentas como o BI (Business Intelligence - Inteligência de Negócios), o DSS (Decision Support System) - Sistema de Suporte a Decisão, o SCM (Supply Chain Management - Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos) entre outras soluções estratégicas também são utilizadas no nível gerencial. A seguir uma breve descrição destas ferramentas.

- ERP (Enterprise Resource Planner): O ERP ou Sistema Integrado de Gestão é definido como um sistema de informação adquirido na forma de pacotes comerciais de software que permitem a integração entre dados dos sistemas de informações transacionais e dos processos de negócios de uma organização JUNIOR (2008).

Davenport conceitua um sistema ERP como um pacote comercial de software que tem a finalidade de organizar, padronizar e integrar as informações transacionais que circulam pelas organizações.

Esses sistemas integrados permitem o acesso a informações confiáveis em uma base de dados central e em tempo real. Esse sistema surgiu em meados da década de 1990 baseado nos conceitos do Sistema CIM com foco na abordagem process-driven (dirigida por processos) visando a integração das informações das organizações através dos seus diversos módulos.

A estrutura típica de um ERP, constituída por diversos módulos é apresentada na figura 7.

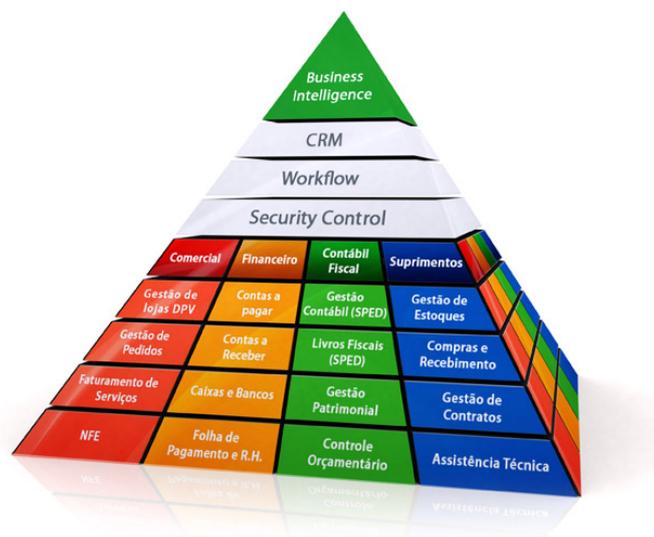


Figura 7: ERP - Estrutura típica do sistema (Fonte: People Solutions)

- BI (Business Intelligence): o BI é o sistema responsável pela síntese dos dados do ERP, apontando indicadores estratégicos para a condução da empresa nas áreas de finanças, contabilidade, patrimônio, ações, entre outras. Ele é utilizado em conjunto com o DSS e o ERP.
- CRM (Customer Relationship Management): é um sistema de gerenciamento de relacionamento com os cliente utilizado para identificar as necessidades e demandas dos mesmos. O sistema integra dados das operações realizadas pelos clientes de modo a identificar tendências e direcionar ações de marketing (URBANSKIENĚ; ŽOSTAUTIENĚ; CHREPTAVIČIENĚ, 2015).
- DSS (Decision Support System): o sistema de suporte a decisão é uma solução que fornece a informação em um nível de detalhe adequado à gerência e supervisão para que a mesma possa tomar decisões adequadas (BANZATO, 2005).
- EIS (Executive Information System): o sistema de informação da execução é um software que assegura a visualização dos indicadores estratégicos de negócio para que a alta cúpula possa tomar decisões de acordo com a realidade dos dados (BANZATO, 2005).

3.3 Integração Vertical

Do ponto de vista da produção, engenharia da automação e tecnologias, a integração vertical se refere a uma integração entre os vários recursos disponíveis nos níveis hierárquicos da pirâmide da automação (como a integração de dispositivos de campo como sensores e atuadores com sistemas de gerenciamento da produção, que situam-se em ní-

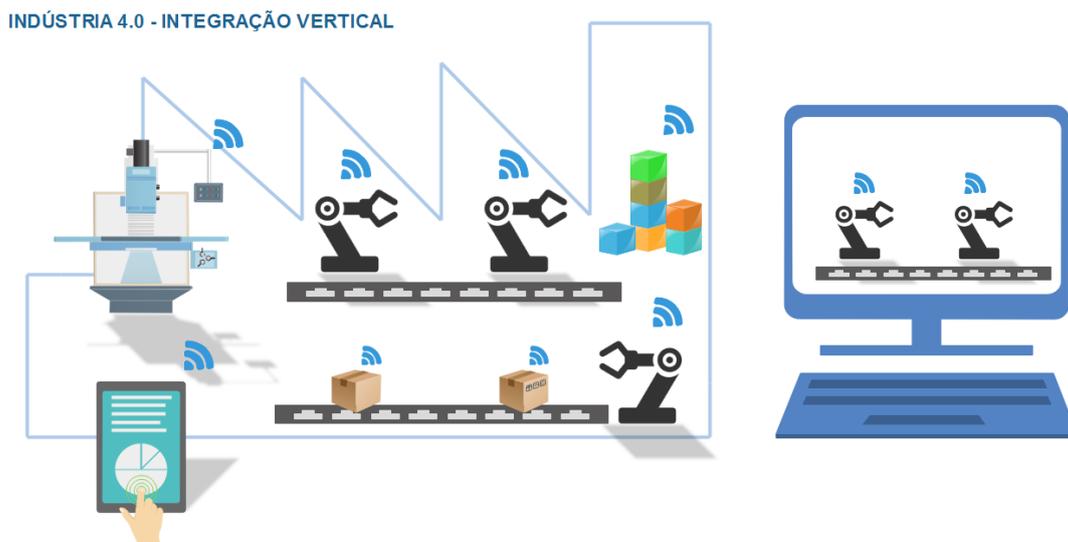


Figura 8: Integração Vertical - Fonte: Adaptado de (KAGERMANN et al., 2013)

veis mais altos) (KAGERMANN et al., 2013).

A integração entre recursos computacionais, como dispositivos e sistemas pode contribuir significativamente para o ganho de tempo e redução de custos de operação. Rotinas de manutenção, supervisão, controle de qualidade e gerenciamento logístico interno podem ser aperfeiçoadas. O tempo de resposta para a solução de problemas internos passa a ser reduzido drasticamente.

Entre as áreas beneficiadas com a integração vertical, pode-se citar a manutenção. Em alguns casos, as fábricas precisam parar a produção para realizar as rotinas de manutenção normais ou a manutenção corretiva.

Os Sistemas Inteligentes de Manutenção (IMS) integrados, atuariam adquirindo dados da saúde dos equipamentos críticos para a produção, prevenindo as falhas em peças através do monitoramento da saúde dos equipamentos. Essas informações internas ficariam acessíveis rapidamente para as equipes de manutenção através da integração vertical. Por outro lado, devido a integração horizontal, o sistema também já poderia encaminhar essa demanda para a cadeia de suprimentos de peças de reposição, agilizando o processo de compra e a programação da manutenção.

As aplicações da integração vertical também aperfeiçoariam o processo produtivo, potencializando o controle de qualidade em todas as etapas da produção. Os estoques passam a ser otimizados, sem gerar custos desnecessários com o armazenamento de produtos, melhorando os processos logísticos.

3.4 Integração Horizontal

A integração horizontal se refere a integração de vários sistemas num mesmo nível funcional, utilizados nos diferentes estágios da manufatura, nos processos de planeja-

mento do negócio que envolvem a troca de materiais, energia e informações tanto dentro de uma empresa (como a logística de entrada, produção, logística de distribuição e marketing) assim como entre diferentes empresas (redes de valor). O objetivo dessa integração é oferecer uma solução de ponta a ponta (KAGERMANN et al., 2013).

INDÚSTRIA 4.0 - INTEGRAÇÃO HORIZONTAL

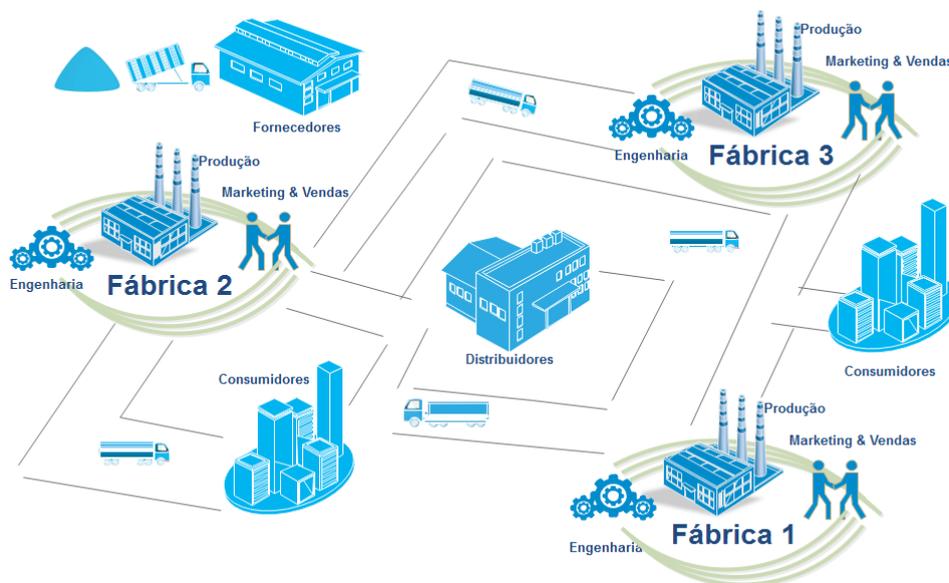


Figura 9: Integração Horizontal - Adaptado de (KAGERMANN et al., 2013)

3.5 Sistemas Ciberfísicos de Produção

O Sistema Ciberfísico de Produção (CPPS - Cyber Physical Production System) é um conceito relacionado com a aplicação de CPS na manufatura, e fundamenta-se nos mais recentes desenvolvimentos da ciência da computação, tecnologias de informação e comunicação (TICs) aplicados a manufatura. Frequentemente o termo é relacionado com a Indústria 4.0, sendo considerada por muitos a tecnologia chave para a nova revolução industrial (MONOSTORI, 2014).

O CPS é um elemento fundamental para o desenvolvimento da fábrica inteligente. Wolfgang Wahlster, um dos diretores científicos do Centro de Pesquisas de Inteligência Artificial na Alemanha (DFKI) ressalta que o CPPS deve promover o desenvolvimento de uma memória semântica para os produtos, utilizando dispositivos de hardware com sensores que permitem localizar, validar e acompanhar a evolução das condições de produção ao longo dos processos (produção, armazenamento, distribuição, etc) (WAHLSTER, 2013).

Monostori destaca que o CPPS podem agregar as abordagens vertical e horizontal de integração. Na pirâmide da automação, o controle típico dos dispositivos de campo é realizado apenas por CLPs ou outros dispositivos de controle local, sem que exista uma

relação direta com níveis mais altos. No CPPS a característica de controle descentralizado dos dispositivos promove uma decomposição dessa hierarquia através de serviços distribuídos (MONOSTORI, 2014).

Atualmente, a interação entre os diferentes níveis ocorre principalmente através da interferência humana. Os dados obtidos ao longo da execução dos processos industriais, adquiridos por meio de redes de sensores, são agrupados, comparados e processados. Após a análise e interpretação desses dados, gerentes, supervisores e coordenadores podem especificar parâmetros para a operação dos equipamentos no chão de fábrica.

Monostori também ressalta que o CPPS habilita e suporta a comunicação entre humanos, máquinas e produtos. Seus elementos são eficientes para adquirir e processar dados, possibilitando o autocontrole de certas atividades e a interação com humanos através de interfaces.

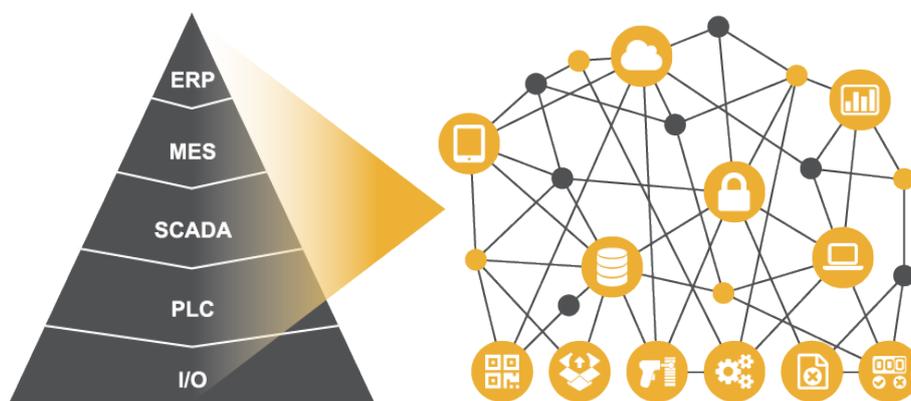


Figura 10: Decomposição da hierarquia da automação através de serviços distribuídos - (MONOSTORI, 2014).

3.6 Tecnologias de Integração Horizontal

O uso de Web Services (WS) para a integração horizontal de sistemas é uma prática cada vez mais comum, em virtude do grande crescimento das aplicações empresariais disponibilizadas através da web. O crescimento e popularização dos dispositivos móveis também contribui para o desenvolvimento e aplicabilidade de interfaces web services. Estas interfaces baseiam-se em SOA e promovem a interoperabilidade entre sistemas distintos.

Os Web Services oferecem uma arquitetura independente e baseada em normas de mercado, regulamentadas e documentadas como o XML, o WSDL, o UDDI e o SOAP. Numa organização, a adoção de WS permite disponibilizar funcionalidades dos sistemas internos de forma a poder integrar, disponibilizar ou mesmo comercializar esses serviços fora da organização. Abordagens tradicionais exigem uma definição prévia de pontos identificados e coordenados para integração (MARTINS, 2006).

Entre as principais tecnologias que estruturam estes tipos de interface temos o SOAP

(Simple Object Application Protocol), o WSDL (Web Service Description Language) e o UDDI (Universal Definition Discovery Interface). Essas soluções são definidas através de formato XML (eXtensible Markup Language).

O SOAP é um protocolo de acesso a objetos que define, em padrão XML, uma estrutura para requisição ou resposta de serviço web (JURIC, 2007). Assim, o SOAP utiliza o padrão WSDL (Web Service Description Language), que é uma linguagem para definição de serviços web estruturado em XML. O WSDL descreve as entradas e saídas do serviço para simplificar a implementação.

O SOAP implementa o conceito de descoberta de serviços através do UDDI (Universal Description, Discovery and Integration). O UDDI é um repositório onde é possível registrar, descrever e integrar serviços usando a internet. O UDDI gerencia informações sobre provedores, implementações e metadados de serviços.

Existem outros formatos de dados para integração como o JSON, e metodologias como o REST, que se apresentam como alternativas ao XML. O REST (Representational State Transfer), ou Transferência de Estado Representacional consiste num estilo arquitetural aplicado para a integração de componentes dentro de um sistema de hipermídia distribuído (FIELDING, 2000).

Por outro lado, o JSON (Javascript Object Notation) é um formato de intercâmbio de dados computacionais originado na notação de objeto da linguagem Javascript. No entanto seu uso não se restringe a essa linguagem. Pode ser usado como uma alternativa ao XML.

O uso de webservices na integração de aplicações distribuídas como serviços, permite o reaproveitamento de soluções através da rede, possuindo uma implementação com baixo nível de complexidade. O uso de UDDI permite a descoberta dinâmica de serviços.

Essas tecnologias podem ser utilizadas como meio de ampliação da integração horizontal, entre empresas parceiras de negócios, promovendo a colaboração através de serviços disponibilizados pela internet. Entre as possíveis aplicações temos a integração da cadeia produtiva e de suprimentos, a otimização logística, o gerenciamento e monitoramento de transportes, entre outras.

3.7 Tecnologias de Integração Vertical

A integração vertical é um desafio que visa a colaboração entre as diferentes aplicações nos níveis gerenciais da empresa. O compartilhamento de dados entre os diferentes níveis gerenciais da empresa exige a definição, especificação e adoção de padrões. A padronização também é um dos requisitos da Indústria 4.0.

O emprego de computadores na manufatura iniciou aproximadamente na década de 1950, e representou um grande salto de produtividade. Nesse tempo, as aplicações eram limitadas para as funções de alto nível, funções no campo de produção, planejamento e

preparação. Entre os anos 1950 e 1960 surgiram os sistema MRP (Materiais Requirement Planning). Nos anos 1970 o MRP II (com novas funcionalidades como o gerenciamento de capacidades e programação da produção). Nesse período também surgiram os sistemas CAD (Computer-Aided Design) e CAM (Computer-Aided Manufacturing) que contribuíram para a melhoria do projeto e reprodução de peças modeladas e construídas com o auxílio de computador (GROOVER, 2010).

O paradigma dos sistemas CIM (Computer Integrated Manufacturing, Manufatura Integrada por Computador) foi uma forte influência para as tecnologias utilizadas na gestão de organizações industriais. Ele surgiu na década de 80 com a finalidade de integrar várias ilhas de automação (SAUTER, 2005).

Já nas próximas décadas, o Sistemas ERP (Enterprise Resource Planning) surgem como sucessor do CIM, e ao contrário dos primeiros projetos da década de 1970, esse sistema poderia explorar o progresso da tecnologia da informação para prover soluções na integração de todos os processos de negócio e funções dentro da empresa, com interfaces externas com clientes e fornecedores.

O ERP é um sistema que busca a integração dos principais processos de negócios de uma organização. Nele são centralizadas as informações relativas a todas as operações envolvendo materiais, produtos e serviços da empresa. Entretanto, o sistema não foi projetado apenas para o uso de organizações industriais, mas pelos mais variados ramos de negócios. Entre os principais módulos do ERP encontram-se os módulos de gestão de estoques, de patrimônio, de aquisições, vendas, o módulo fiscal e contábil, de recursos humanos e planejamento e controle da produção (PCP).

Nesse mesmo sentido, existem alguns projetos como o AutomationML (AML). O AML estabelece um padrão para a integração entre sistemas de engenharia de fornecedores diferentes (BIFFL; SCHATTEN; ZOITL, 2009a). Trata-se de um padrão emergente para ferramentas de trocas de dados entre sistemas industriais, harmonizando dados de engenharia com dados de redes heterogêneas, o que significa que o formato de dados é unificado em um modelo de dados para posterior integração (WIMMER, 2012).

O AML especifica uma descrição baseada em XML com uma sintaxe padronizada, no entanto possui uma fraca semântica, o que leva a dificuldades na integração de modelos complexos em constante transformação. Desta forma, o AutomationML não pode ser considerado um formato totalmente universal (NOVAK; MORDINYI, 2015).

A integração vertical também pode ser promovida por Sistemas Multiagentes (Multi-Agent Systems - MASs). Esses sistemas podem representar uma abordagem efetiva e flexível para desenvolver funcionalidades para sistemas de automação. Esses sistemas são oriundos dos conceitos da Inteligência Artificial Distribuída (DAI - Distributed Artificial Intelligence) e já possuem um certo grau de maturidade na ciência. (YU; SCHÜLLER; EPPLE, 2014) também reportam que orientação à agentes tem mostrado potencial em vários domínios da automação, como o gerenciamento de energia, programação da

produção, design de produtos e reconfiguração de falhas em dispositivos de campo.

A IoT e IoS também podem ser citadas como tecnologias propulsoras da integração vertical, através dos dispositivos e serviços disponibilizados através de redes e protocolos de comunicação como o TCP/IP, associados a novos protocolos de trocas de mensagens entre máquinas e sistemas, facilitando a troca de dados e a geração de novas informações.

3.8 A Interação Humana

O desenvolvimento de arquiteturas para manufatura deve considerar que existe um circuito de interações entre dispositivos, máquinas e pessoas. Sakamoto et al destacam a necessidade da investigação das interações das pessoas nesse ambiente híbrido de elementos digitais e físicos (SAKAMOTO et al., 2014). Schirner et al fala da importância de considerar o homem no loop das interações (SCHIRNER et al., 2013).

Considerando o progresso da evolução tecnológica, pode-se assumir que grande parte dos problemas e demandas para os humanos no espaço da fábrica devem mudar. Se máquinas e seus componentes passarem a ganhar mais autonomia se auto-configurando e auto-organizando, então se terá um cenário de manufatura muito mais complexo, dinâmico e autônomo. A interação entre humanos e os sistemas tecnológicos ocorre através da manipulação direta ou através de interfaces (GORECKY; SCHMITT, 2014).

Diferentes "tipos de humanos" devem ser capazes de interagir com as tecnologias de modo que seja possível fornecer e receber feedback. Os efeitos das ações desses usuários devem ser calculados, de forma que um "mal usuário" não consiga acessar dados que comprometam o sistema (WEYNS; BURES, 2015).

Entre as diferentes categorias de usuários a interagir dentro da arquitetura pode-se citar: I) Engenheiros e projetistas: aqueles que criam e desenvolvem as arquiteturas; II) Usuários finais: aqueles que usam o sistema e III) Humanos fora do sistema: aqueles que interagem de alguma outra forma com os sistemas.

Outro desafio relacionado com a interação humana no ambiente de manufatura é a evolução das interfaces utilizadas para as interações com os elementos do mundo virtual, como as telas, teclados e mouses. Nessa perspectiva, a aplicação de tecnologias de computação gráfica e visão computacional são importantes para prover diferentes possibilidades para a Indústria 4.0 (POSADA et al., 2015).

O uso de interfaces multimodais, que possibilitam a interação intuitiva combinando elementos do mundo virtual com o mundo real, através de tecnologias como a realidade virtual, mista e aumentada pode potencializar a realização de tarefas de manutenção industrial entre outras (PORCELLI et al., 2014; ESPÍNDOLA et al., 2011). Através da realidade aumentada, informações relevantes podem ser disponibilizadas diretamente através de plataformas mobile, como os smartphones, tablets e óculos inteligentes (GORECKY; SCHMITT, 2014).

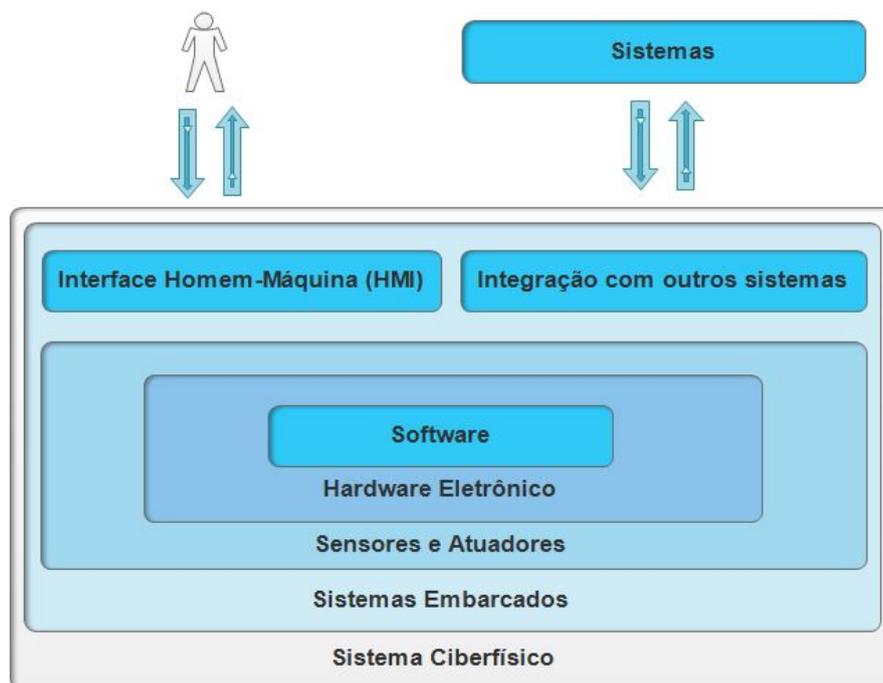


Figura 11: Interação entre humanos e máquinas em um sistema ciberfísico - (MONOSTORI, 2014)

A figura 12 retrata a visão de futuro de uma fábrica inteligente nos conceitos da Indústria 4.0. Máquinas, produtos e pessoas interagem através de tecnologias de comunicação sem fio e dispositivos IoT. Os colaboradores utilizam dispositivos móveis e interagem em tempo real com elementos virtuais e físicos através de interfaces multimodais, otimizando o processo produtivo.



Figura 12: Representação da Aplicação do CPS na Manufatura (CPPS) - Fonte: DFKI, 2012.

3.9 Análise de Trabalhos Relacionados

Uma análise de diversos trabalhos relacionados, que abordam a integração dos níveis de gerenciamento industrial e o desenvolvimento de sistemas ciberfísicos de produção é apresentado nesta seção.

Dada a importância do tema, nos últimos anos cresceram as pesquisas envolvendo as aplicações de CPS no meio acadêmico. O gráfico representado na figura 13 ilustra o crescente interesse da comunidade científica pelo termo, que possui aplicações em diversas áreas, incluindo a manufatura.

O gráfico ilustrado na figura 13 foi elaborado considerando apenas os trabalhos que apresentavam o termo "cyber-physical system" em seus títulos ou resumos, publicados entre os anos de 2010 até 2015 pela IEEE, Science Direct ou indexados pelo Google Scholar.

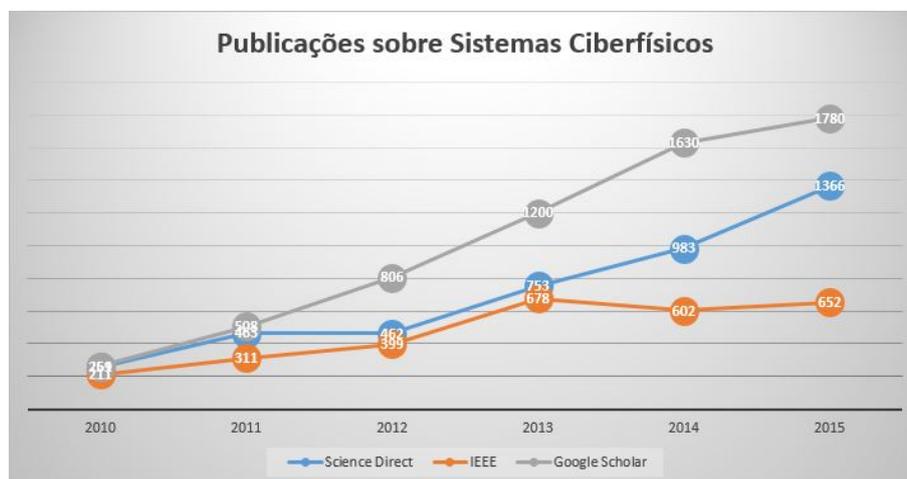


Figura 13: CPS - Publicações acadêmicas dos últimos anos

A aplicação do CPS na manufatura também é conhecida pelo termo CPPS (Cyber Physical Production System). Na sequência apresenta-se um conjunto de trabalhos relacionados que abordam a integração dos níveis de gerenciamento ou discorrem acerca de arquiteturas para o desenvolvimento de sistemas ciberfísicos aplicados no contexto da manufatura.

A integração entre os níveis de gerenciamento industrial vem sendo alvo de diversos trabalhos de pesquisas nos últimos anos. Os trabalhos exploram diferentes aspectos como a integração de dados, a integração semântica, a integração de processos e sistemas, bem como a integração de sistemas de controle.

Além desses aspectos, alguns autores também ressaltam a importância da integração humana, e o seu papel no contexto da Indústria 4.0 (SAKAMOTO et al., 2014; SCHIRNER et al., 2013). A seguir, relaciona-se os principais aspectos associados à integração no contexto industrial:

Em (JURIC, 2007) é apresentada uma proposta de integração baseada no paradigma

SOA. O trabalho trata da integração de dados, processos de negócios e da integração de sistemas gerenciais através de web services.

Em (TAN; GODDARD; PEREZ, 2008) é proposta uma arquitetura para sistemas ciberfísicos onde são tratados aspectos de sistemas de controle e interação humana. O objetivo do trabalho é a identificação dos requisitos para desenvolver sistemas ciberfísicos considerando a interação com o usuário. O A arquitetura é genérica, e possui aplicação em diferentes áreas, não sendo específica para aplicações no ambiente de manufatura.

No trabalho de (BIFFL; SCHATTEN; ZOITL, 2009b) é abordada a integração de ambientes heterogêneos de engenharia para o ciclo de vida de sistemas de automação. A proposta não trata especificamente o CPS, mas apresenta aspectos relacionados como a integração semântica, integração de processos de negócios, integração de sistemas gerenciais e sistemas de controle introduzindo o conceito de Barramento de Serviço de Automação (ASB - Automation Service Bus). Esse barramento atua como um canal de integração para sistemas de engenharia (instrumentação, elétrica) com sistemas de supervisão industrial (SCADA), assim como visa a integração com outros elementos da engenharia de software.

(COLOMBO; KARNOUSKOS, 2009) define uma abordagem para a integração de sistemas baseado em SOA. Aborda-se aspectos importantes das fábricas inteligentes, como a customização da produção em massa, a flexibilização e reconfiguração dos sistemas de produção. A arquitetura de integração constituída por camadas que cobrem diferentes aspectos da organização industrial (vide figura 14), desde a camada dos dispositivos até as aplicações empresariais. Essa arquitetura trata de integração de processos de negócios, integração de sistemas gerenciais e de controle. Também apresenta elementos de interação humana.

Por outro lado, (NOVAK; SINDELAR, 2012) tratam dos aspectos de design e integração semântica de modelos na área de automação industrial visando a simulação.

(HU et al., 2012) faz uma revisão sobre as arquiteturas para sistemas ciberfísicos e propõe uma arquitetura genérica baseada em SOA ilustrada pela figura 15. A arquitetura proposta por Hu possui cinco camadas: I) Camada de Percepção; II) Camada de Execução: responsável pelas ações de atuação no ambiente. III) Camada de Serviços: APIs para os consumidores, a tomada de decisão e análise e programação de tarefas; IV) Camada de Dados e V) Camada de segurança.

Outra arquitetura é proposta em (KARNOUSKOS et al., 2012) baseada na colaboração e tecnologias de cloud-computing. A arquitetura apresenta elementos de integração de dados, aborda a integração de sistemas, a integração de processos de negócios e sistemas de controle. Também trata de elementos como o gerenciamento de acessos (aspectos de segurança cibernética) e interação humana. Entre as características dessa arquitetura encontram-se elementos focados no gerenciamento do ciclo de vida dos produtos, a simulação, manutenção, monitoramento de processos e ferramentas de diagnóstico.

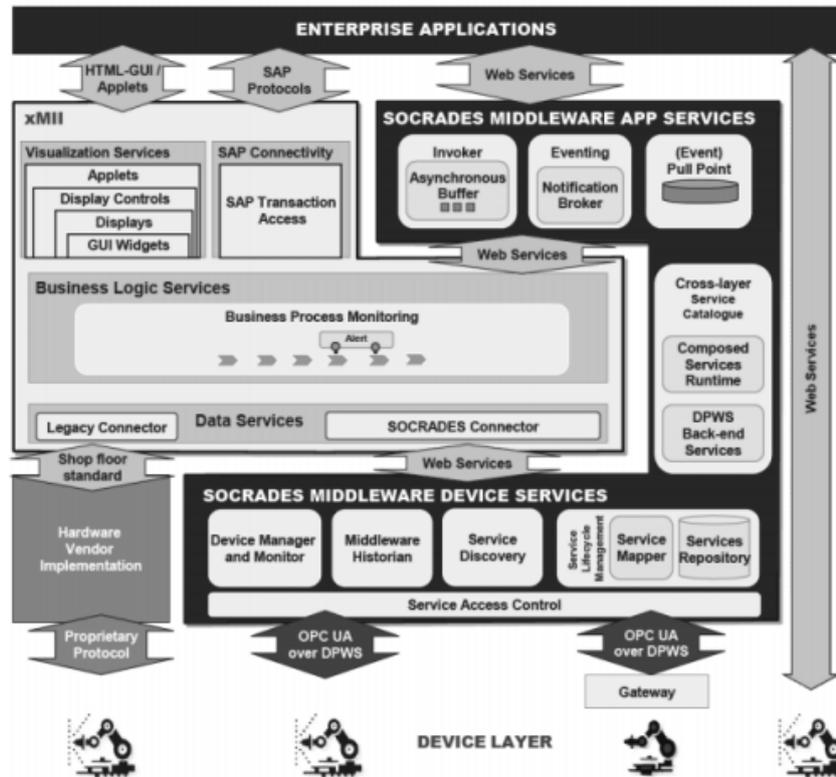


Figura 14: Arquitetura de Infraestrutura Orientada a Serviços. Fonte: (COLOMBO; KARNOUSKOS, 2009)

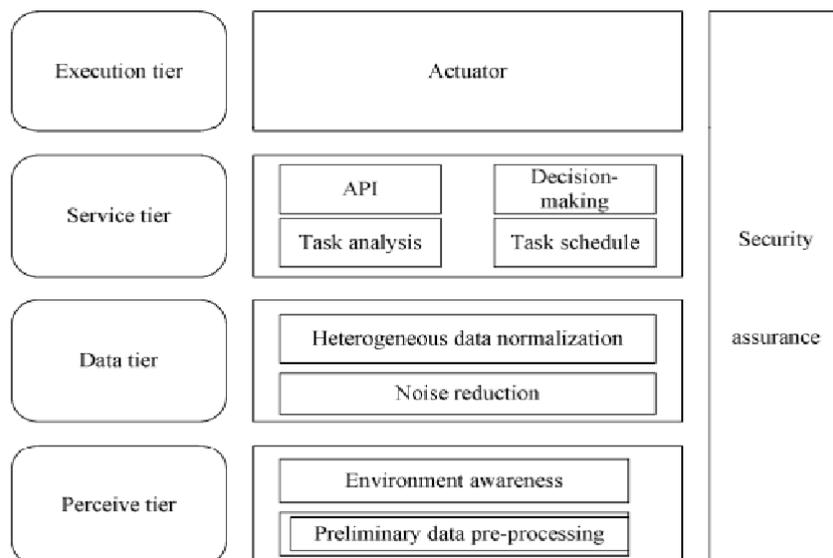


Figura 15: CPS Baseado em SOA - Fonte: (HU et al., 2012)

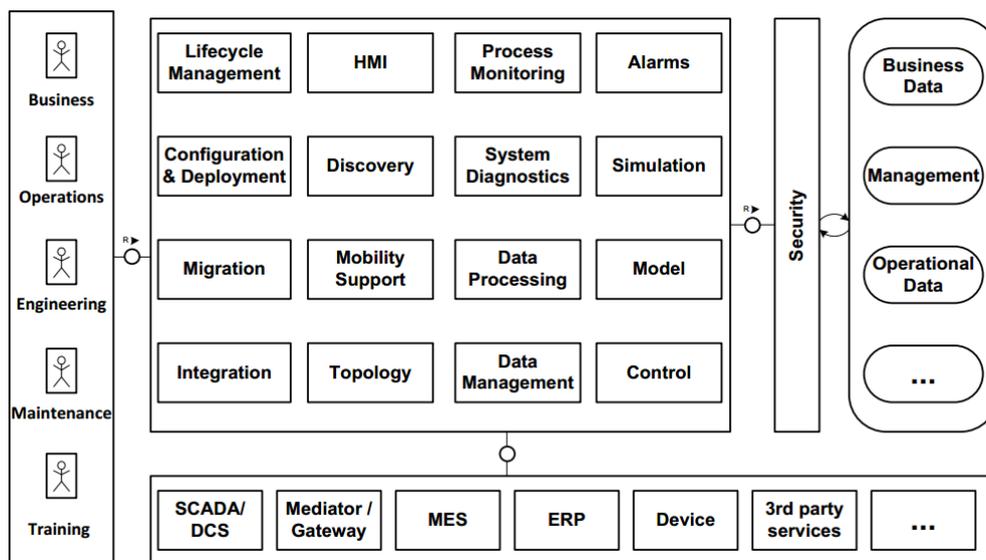


Figura 16: CPS Baseado em SOA - Fonte: (KARNOUSKOS et al., 2012)

(YU; JING; LI, 2012) apresenta uma proposta de arquitetura para sistemas ciberfísicos baseada em SOA (vide figura 17). Os dispositivos físicos são abstraídos como "serviços". Essa abordagem possibilita que o CPS implemente a descoberta de serviços, a composição de serviços, entre outras características das tecnologias SOA.

Considerando essas características os autores propõem uma arquitetura CPS composta em três camadas: camada física, camada de serviços e a camada de aplicação. A camada física é composta pelos dispositivos, que disponibilizam serviços por meio de conexões de rede usando diferentes tecnologias de rede (ZigBee, Bluetooth, Wifi, etc). A segunda camada visa a orquestração e arranjo dos serviços disponibilizados pelos dispositivos físicos, associando o serviço disponível com os agentes que o utilizam. A camada de aplicação compreende sistemas de controle, como os sistemas supervisórios, entre outras aplicações que solicitam e consomem serviços para controlar processos ou recuperar dados para realizar processos mais pesados de computação.

(KAGERMANN et al., 2013) apresenta um guia de recomendações para a implementação da iniciativa estratégia "Indústria 4.0" do governo alemão. Esse guia de recomendações tem o objetivo de nortear atividades de pesquisa e ações do governo, esclarecendo os termos e tecnologias adotadas no âmbito do projeto.

O trabalho apresenta um exemplo de arquitetura de alto nível para uma plataforma baseada em CPS (vide figura 18). Essa arquitetura trás uma visão holística da integração horizontal e vertical, considerando não apenas os aspectos internos da empresa, mas sua organização para atender os clientes. A arquitetura representada foi organizada em dois blocos principais: os clientes, e a plataforma de agregação. O bloco de clientes é formado por consumidores, parceiros de negócios e empresas de prestação de serviços. A plataforma de agregação é formada por vários componentes, visando a cobertura das principais

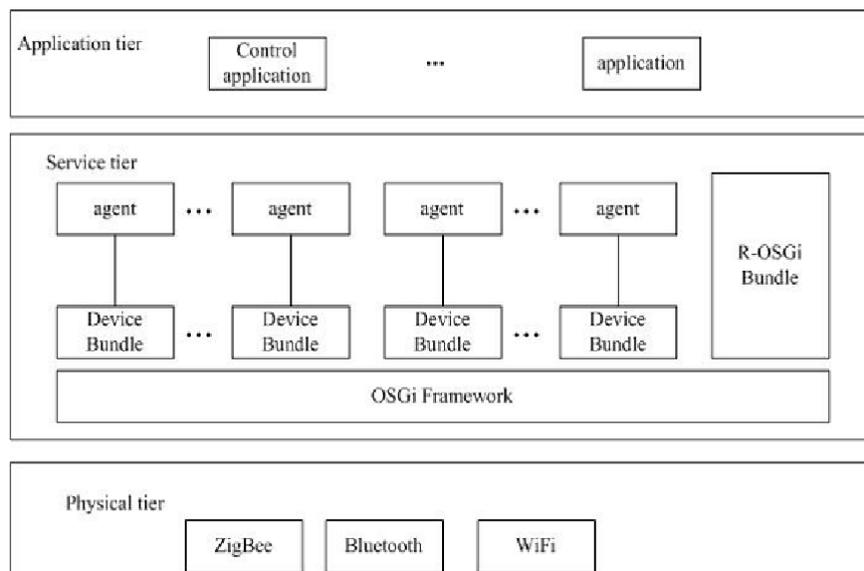


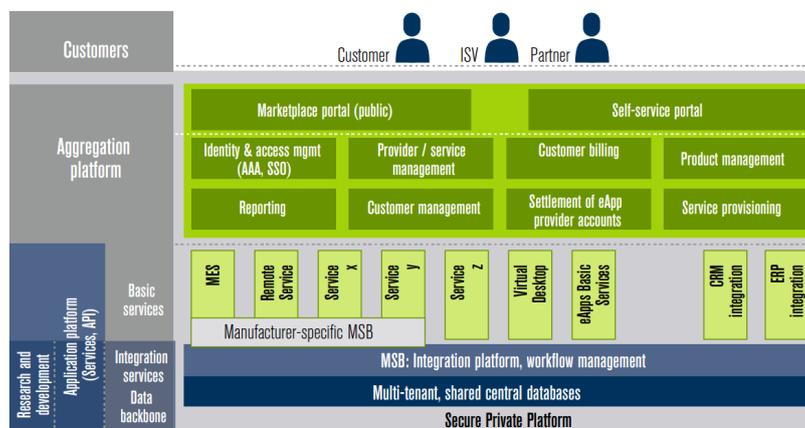
Figura 17: Arquitetura de CPS Baseada em Serviços - Fonte: (YU; JING; LI, 2012)

áreas da empresa, como o gerenciamento de produtos, clientes e serviços.

A integração é realizada através de um barramento denominado MSB (Multiple System Bus), onde diferentes plataformas e sistemas são integrados para fornecer um gerenciamento do fluxo de trabalho.

Entre os aspectos de integração abordados ao longo do trabalho, tem-se a integração de processos de negócios, integração de sistemas gerenciais, integração de sistemas de controle, integração e interação humana. Ao longo do texto, os autores apresentam uma visão da aplicação do CPS em alto nível, e como ele pode contribuir para o desenvolvimento de fábricas inteligentes.

Figure 11:
Example reference
architecture for a
CPS platform



Source: Hewlett-Packard 2013

Figura 18: Exemplo arquitetura de plataforma CPS - Fonte: (KAGERMANN et al., 2013)

(BANGEMANN et al., 2014) apresentam uma síntese dos elementos que compõem o estado da arte em automação industrial e propõem uma arquitetura baseada em servi-

ços, utilizando conceitos de SOA e tecnologias como os web services. Os autores discutem sobre os principais padrões de organização do ambiente industrial e destacam o ISA-95/IEC 62264 (www.isa-95.org), que define a organização dos níveis gerenciais da pirâmide da automação.

A arquitetura se baseia no uso intenso de web services para integrar sistemas gerenciais e sistemas de engenharia com dispositivos físicos. São apresentados elementos como os gateways e mediadores de serviços, que servem para integrar dispositivos como sensores e atuadores wireless com dispositivos legados.

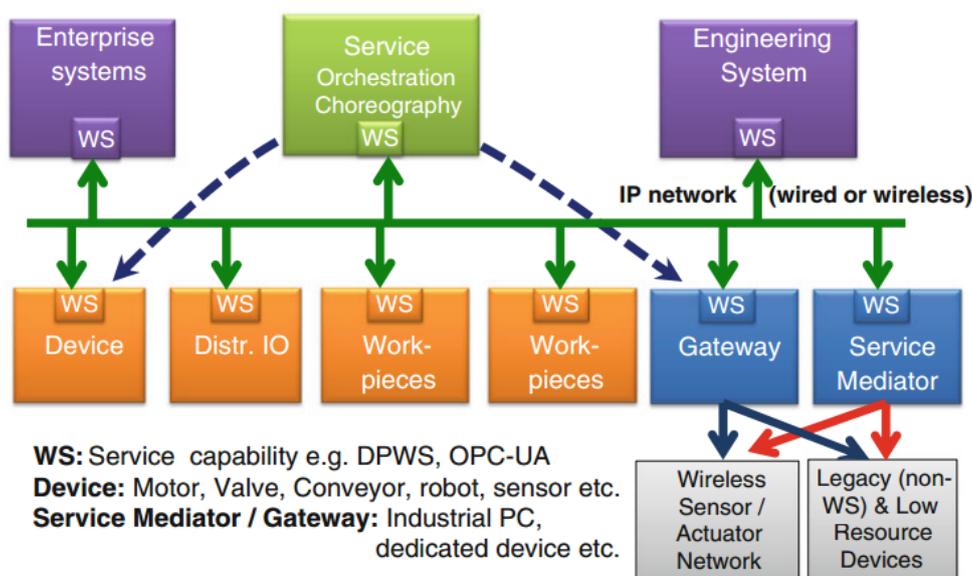


Figura 19: Arquitetura para sistemas de produção baseada em SOA - Fonte: (BANGEMANN et al., 2014)

(LI; WANG; ZHOU, 2014) propõe uma arquitetura para CPS baseada em eventos. O trabalho apresenta uma abordagem diferente para a concepção e representação de CPS através de eventos. Segundo os autores, no CPS, os eventos são definidos através de um conjunto de propriedades, dentro de um modelo computacional, que dispara mudanças de estados e comportamentos em certas condições, invocando comportamentos físicos. Essa abordagem reduz o número de requisições aos serviços, uma vez que esses são acionados apenas na ocorrência de eventos especificados.

O trabalho não possui objetivos relacionados com aplicações na manufatura, mas propõem uma arquitetura representada na figura 20, que apresenta características como a integração de aplicações e sua relação com o controle de processos físicos através de um mecanismo de controle baseado em eventos.

Outro trabalho interessante, é apresentado em (LEE; BAGHERI; KAO, 2014). Ao longo do texto os autores propõem uma metodologia para o desenvolvimento do CPS baseado nos elementos da indústria 4.0 explorando técnicas e elementos de análise de big data para extrair conhecimento de grandes volumes de dados. Os autores propõem uma metodologia para realizar o registro do comportamento dos modelos virtuais, seus com-

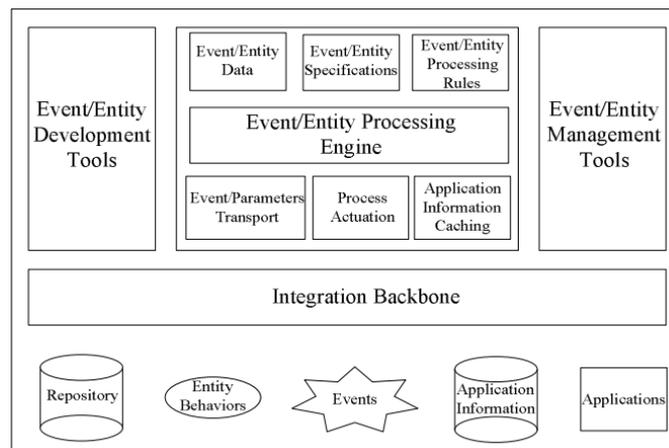


Figura 20: Uma arquitetura para CPS orientada a eventos - Fonte: (LI; WANG; ZHOU, 2014)

ponentes e suas variações ao longo do tempo, criando um conjunto de dados históricos que podem ser analisados através algoritmos inteligentes de prognóstico.

	Fonte de Dados	Fábricas de Hoje		Fábricas da Indústria 4.0	
		Atributos Chave	Tecnologias Chave	Atributos Chave	Tecnologias Chave
Componente	Sensor	Precisão	Sensores Inteligentes Detecção de Falhas	Auto-conhecimento Auto-predição	Monitoramento da Degradação Predição e monitoramento da vida útil
Máquina	Controlador	Produtividade Performance Qualidade Rastreabilidade	Monitoramento Baseado em Condição Diagnósticos	Auto-conhecimento Auto-predição Auto-comparação	Monitoramento do tempo disponível Monitoramento preditivo de Saúde
Sistema de Produção	Sistema de Manufatura em Rede	Produtividade Efetividade (OEE)	Operação Lean Redução do trabalho Redução do Disperdício	Auto-Configuração Auto-Manutenção Auto-Organização	Worry-Free (sem preocupação) Produtividade

Figura 21: Comparação entre as fábricas de hoje e as fábricas da Indústria 4.0 - Fonte: (LEE; BAGHERI; KAO, 2014)

Os autores apontam para a necessidade de desenvolver um modelo gêmeo (twin model) dos elementos do mundo real, como os componentes, máquinas e elementos de produção no ciberespaço. Os dados desses elementos são transferidos para uma interface ciberfísica, onde ocorre a análise, teste e síntese virtual. As informações dessa síntese são repassadas para o ciberespaço em ordem cronológica, possibilitando a reconstrução do modelo em função do tempo para gerar modelos de análise de risco e degradação.

(GORECKY; SCHMITT, 2014) aborda o aspecto humano no contexto da Indústria 4.0 e suas interações com o CPS. O trabalho relata soluções tecnológicas para auxiliar os trabalhadores, e aborda a interação humana com o CPS através de interfaces inteligentes.

Nesse mesmo trabalho, os autores demonstram o potencial da aplicação da realidade aumentada como uma das tecnologias para o desenvolvimento de interfaces para interação humano-máquina da Indústria do futuro. Por fim, o trabalho propõe uma arquitetura (vide figura 23), para a implementação de aplicações com interfaces multimodais que

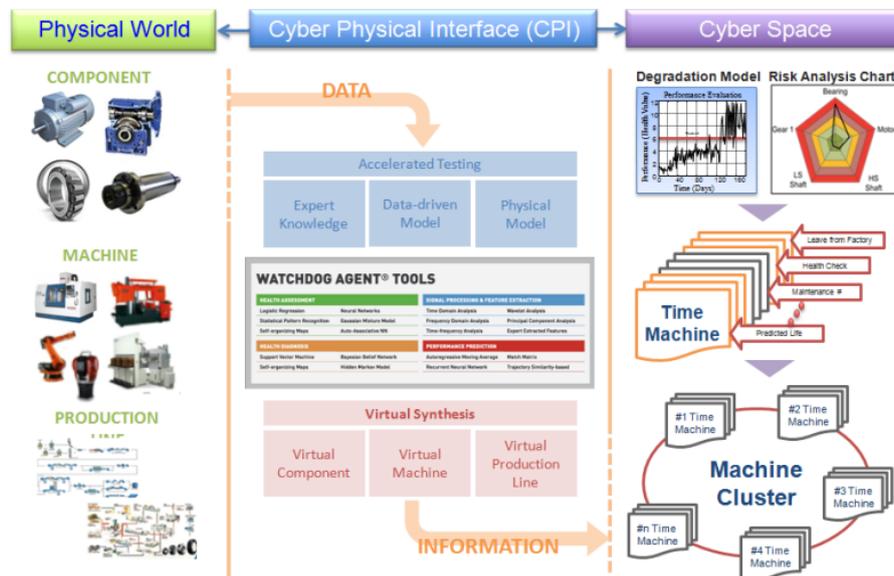


Figura 22: Metodologia para o Desenvolvimento de CPS baseado em Sistemas da Industria 4.0 - Fonte: (LEE; BAGHERI; KAO, 2014)

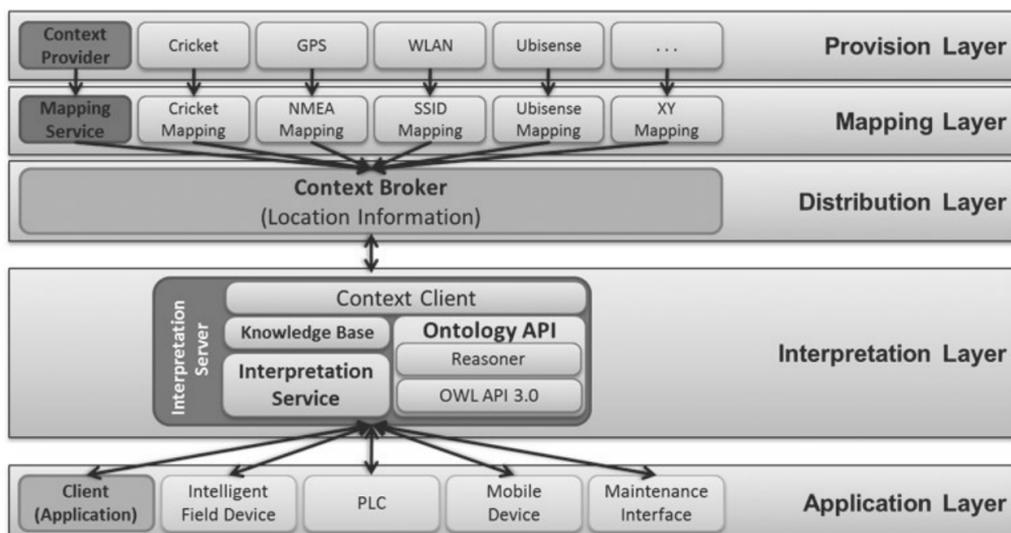


Figura 23: Arquitetura baseada no contexto para prover informação e interpretação considerando a localização do usuário humano no ambiente da industria 4.0 - Fonte: (GORECKY; SCHMITT, 2014)

possibilita a provisão e interpretação da informação em função do contexto. A arquitetura explora o uso de dispositivos móveis, com seus sensores e conectividade para prover a interação entre os trabalhadores e os elementos da fábrica inteligente, provendo interações avançadas com o CPS através de realidade virtual e aumentada.

Os autores estruturam a arquitetura em cinco camadas: I) Camada de Provisão; II) Camada de Mapeamento: permite situar a localização do trabalhador; III) Camada de Distribuição: localiza as informações; IV) Camada de Interpretação e Ontologia: analisa e faz o processamento das informações relevantes ao trabalhador; V) Camada de Aplicação: integração com outros sistemas e dispositivos.

(JAZDI, 2014) destaca o uso de dispositivos da IoT, dotados de comunicação, capacidade de computação e controle, associados a elementos de computação na nuvem como tecnologias habilitadoras para o desenvolvimento de sistemas ciberfísicos.

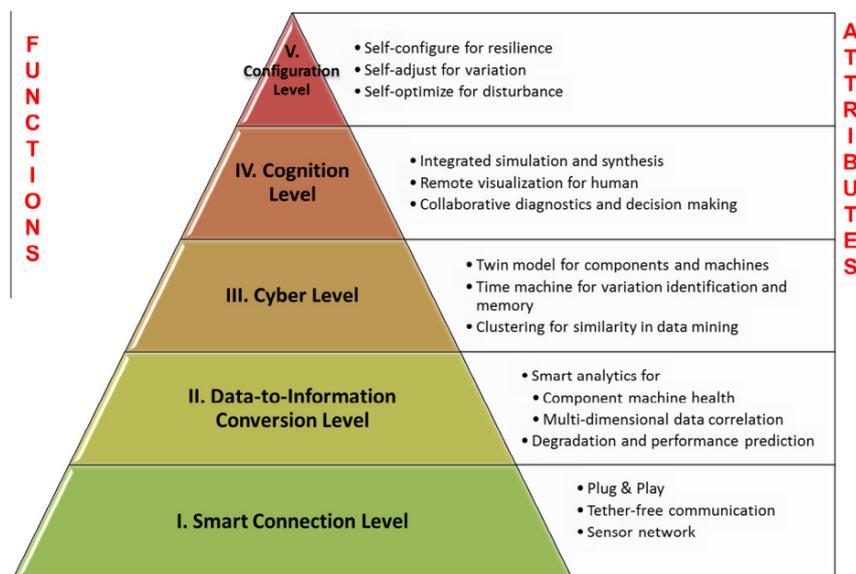


Fig. 1. 5C architecture for implementation of Cyber-Physical System.

Figura 24: Arquitetura 5C para a implementação de sistemas ciberfísicos - Fonte: (LEE; BAGHERI; KAO, 2015)

(LEE; BAGHERI; KAO, 2015) propõe uma arquitetura para CPS baseada nos conceitos dos sistemas de inteligentes de manutenção (IMS). A arquitetura proposta, nominada "5-C Architecture", representada na figura 24 possui dois componentes funcionais fundamentais: I) Conexão avançada: uma conexão capaz de suportar a aquisição de dados do mundo físico e transferir o feedback do espaço cibernético em tempo real; II) Gerenciamento Inteligente de Dados: o CPS deve ser capaz de gerenciar dados de modo inteligente, utilizando a capacidade computacional para estruturar e construir o espaço cibernético.

Um outro trabalho de (KAO et al., 2015) que descreve a aplicação da arquitetura 5-C para a implementação de sistemas ciberfísicos, analisada anteriormente. O estudo

apresenta uma abordagem para a aquisição e representação da saúde dos equipamentos monitorados que eventualmente pode ser utilizada para otimizar o processo de fabricação e estender a colaboração entre os membros da cadeia de suprimentos.

(NOVAK; MORDINYI, 2015) apresenta outra abordagem para a integração de sistemas de automação industrial, onde os autores fundamentam-se nos conceitos do barramento de serviços empresariais (ESB), oriundo da engenharia de software para propor uma arquitetura de integração que eles denominam "EngSB", que estende os conceitos do ESB para aplicações no contexto industrial.

Embora o trabalho não apresente nenhuma referência específica para os sistemas ciberfísicos, os conceitos utilizados na especificação tornam evidente o objetivo de promover a integração dos sistemas empregados no nível de supervisão industrial com os demais níveis de gerenciamento. Os autores descrevem uma implementação de integração de sistemas de engenharia com sistemas de supervisão industrial (SCADA). Eles defendem a integração de ferramentas computacionais, dados e conhecimento para potencializar o gerenciamento das fábricas no futuro.

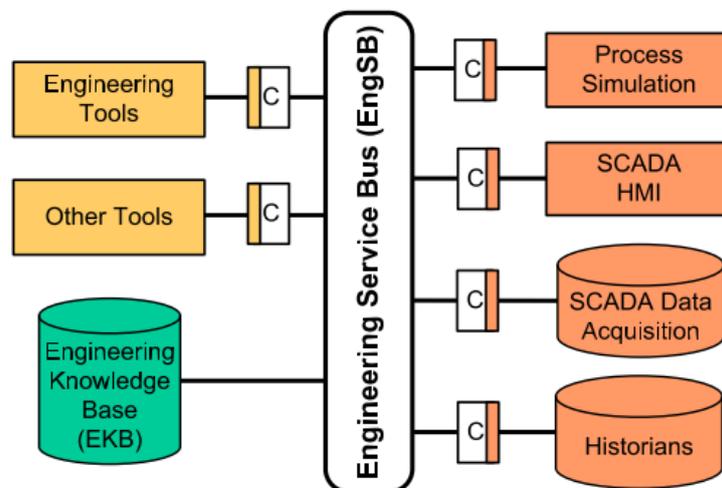


Figura 25: EngSB - Integração de Ferramentas de Supervisão e Engenharia - Fonte: (NOVAK; MORDINYI, 2015)

Finalmente, (CPS PWG, 2015) que tem por objetivo concentrar os estudos em torno do CPS e suas aplicações para estruturar um framework que sirva como um guia no desenvolvimento dos conceitos e implementações nesse novo paradigma. O estudo ainda está em desenvolvimento, mas identifica os conceitos chaves em torno do CPS e estrutura um vocabulário e uma arquitetura de referência, abordando diferentes perspectivas e facetas, como a segurança cibernética e privacidade, tempo e sincronização, interoperabilidade de dados, casos de uso e aplicações, entre outros aspectos.

Os autores preconizam que o CPS atua como um "Sistema de Sistemas"(SoS), ou seja, um sistema capaz de reunir diversos elementos, incluindo outros sistemas dentro de uma

composição de modo abrangente e multidimensional (vide figura 26). O CPS pode ser visto como um produto de engenharia com capacidade computacional e física integrados, que pode agir de modo automático e cada vez mais autônomo, para produzir interações com entidades físicas, ambientes e os próprios seres humanos.

Na visão dos autores, enquanto alguns CPSs podem operar isoladamente, outros podem operar em conjunto para produzir efeitos físicos em larga escala. Com as tendências globais de tecnologia em computação avançada e fabricação, sensoriamento generalizada e conectividade de rede ubíqua, o CPS provavelmente deve avançar em duas grandes direções:

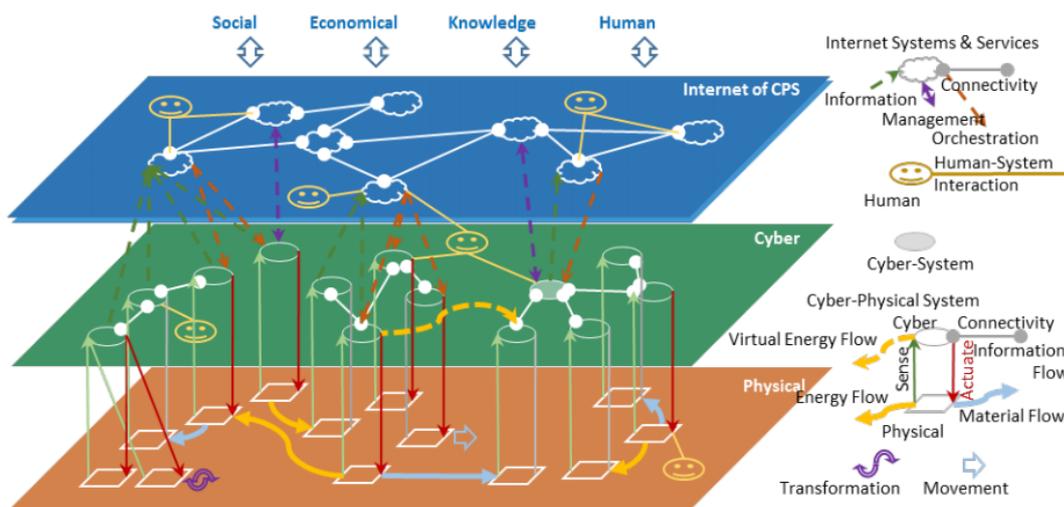


Figura 26: A visão do CPS: Sistema de Sistemas - Fonte: (CPS PWG, 2015)

3.10 Considerações

Nesse capítulo foi abordado a integração de sistemas na manufatura apresentando conceitos como a integração vertical e horizontal e os trabalhos relacionados.

Foram apresentadas algumas das tecnologias e abordagens utilizadas para integrar sistemas e dispositivos dos diferentes níveis gerenciais, como o barramento de serviços, os web services, o AutomationML, Sistemas Multiagentes e CPPS.

A utilização de sistemas cibernéticos- físicos de produção como tecnologia para integração, promove a decomposição da estrutura hierárquica da pirâmide da automação para um modelo de controle descentralizado. Também foi abordado alguns aspectos da interação humana, tanto no modelo atual como frente a novas tecnologias.

Como pode ser observado na análise dos trabalhos relacionados, existem várias abordagens no sentido de promover uma maior coesão entre os níveis gerenciais, no sentido vertical e também no horizontal. O CPS não é a única proposta nesse sentido, mas vem sendo cada vez mais discutido como um caminho para o desenvolvimento de fábricas

inteligentes da Indústria 4.0, capazes de produzir com mais eficiência e sustentabilidade.

Entretanto, o desenvolvimento desses sistemas constitui um grande desafio de engenharia, pela fato de ser multidisciplinar e envolver a integração e sincronização de diversos componentes, incluindo outros sistemas. Existem diversos aspectos que devem ser analisados que vão além de questões tecnológicas, como os aspectos relacionados ao ser humano, a criação de leis e a regulamentação de normas e padrões para esse novo paradigma. No entanto, o foco deste trabalho é a análise dos elementos de composição tecnológica do CPS, e quais são os aspectos de integração abordados em cada proposta.

Dentre as arquiteturas analisadas, pode-se observar a dificuldade da cobertura de todos os aspectos do CPS, dada a sua grande abrangência. Entretanto, pontos relativos ao processo de virtualização e representação virtual dos componentes da fábrica ainda são pouco explorados. As arquiteturas que apresentam elementos de virtualização não descrevem muitos detalhes do processo de concepção do modelo virtual, mas apontam para a relação desse modelo com os dados adquiridos da planta e a análise de dados.

Outro ponto bastante recorrente é a integração de sistemas, que aparece em vários trabalhos, como um dos pontos do CPS, visando a combinação e melhor aproveitamento de suas fontes de dados e funcionalidades. O paradigma de orientação a serviços, através do qual os dispositivos e sistemas podem fornecer uma interface de compartilhamento de dados e funcionalidades também é visto como uma boa estratégia para a orquestração dos elementos distribuídos do CPS.

Todos os trabalhos que citam o CPS, enxergam o CPS como um sistema de controle avançado, capaz de prover um comportamento autônomo que falta aos sistemas de automação da atualidade, promovendo a auto-configuração e a resiliência do sistema. A Indústria 4.0 deve impulsionar a customização da produção, e o desenvolvimento de linhas de produção onde diferentes produtos são concebidos simultaneamente. O CPS é visto como o sistema capaz de gerenciar e controlar esse ambiente altamente flexível de produção.

Assim, no próximo capítulo será proposta uma arquitetura e middleware CPPS para a integração dos níveis vertical e horizontal destacando a interação humana no CPS como fator integrador nos níveis de gerenciamento.

4 ARQUITETURA E MIDDLEWARE CPPS

O objetivo desse capítulo é propor uma arquitetura para a integração dos níveis de gerenciamento industrial orientada pelos princípios da Indústria 4.0 e pelos conceitos dos sistemas ciberfísicos.

A aplicação do CPS no contexto da manufatura é promissora, mas carece de arquiteturas e metodologias que viabilizem a sua implementação (LEE; BAGHERI; KAO, 2015).

Esse trabalho visa contribuir para o preenchimento dessa lacuna, apresentando uma proposta de arquitetura para a implementação do CPS no ambiente de manufatura.

4.1 Estrutura da Arquitetura

A arquitetura proposta nesse capítulo visa o desenvolvimento do CPPS e está representada em alto nível pela figura 27. A proposta para arquitetura prevê essencialmente cinco camadas: a camada humana, a camada de interação humano-computador (HCI), a camada de aplicação, a camada cibernética e a camada física.

O foco desse trabalho reside na definição da camada cibernética. Abaixo uma breve descrição de cada uma dessas camadas:

- **Camada Humana:** formada por todos os agentes humanos. As pessoas são vistas como os recursos inteligentes do CPPS, atuando desde a manutenção e operação de máquinas, materiais e produtos até as atividades estratégicas do nível gerencial, como a realização de contratos e o planejamento estratégico. No contexto da fábrica inteligente o ser humano é visto como um dos principais recursos do CPPS, dada a sua capacidade de analisar informações, tomar decisões e interagir com o sistema através de interfaces humano-computador. A inteligência de fábricas no contexto da indústria 4.0 deve capturar e reutilizar o conhecimento dos especialistas humanos dentro destes sistemas e conseqüentemente aperfeiçoar as interfaces humano-computador.
- **Camada de Interação Humano-Computador (HCI):** essa camada é formada pelos dispositivos e sistemas que viabilizam a interação humana com os demais elementos

ARQUITETURA CPPS

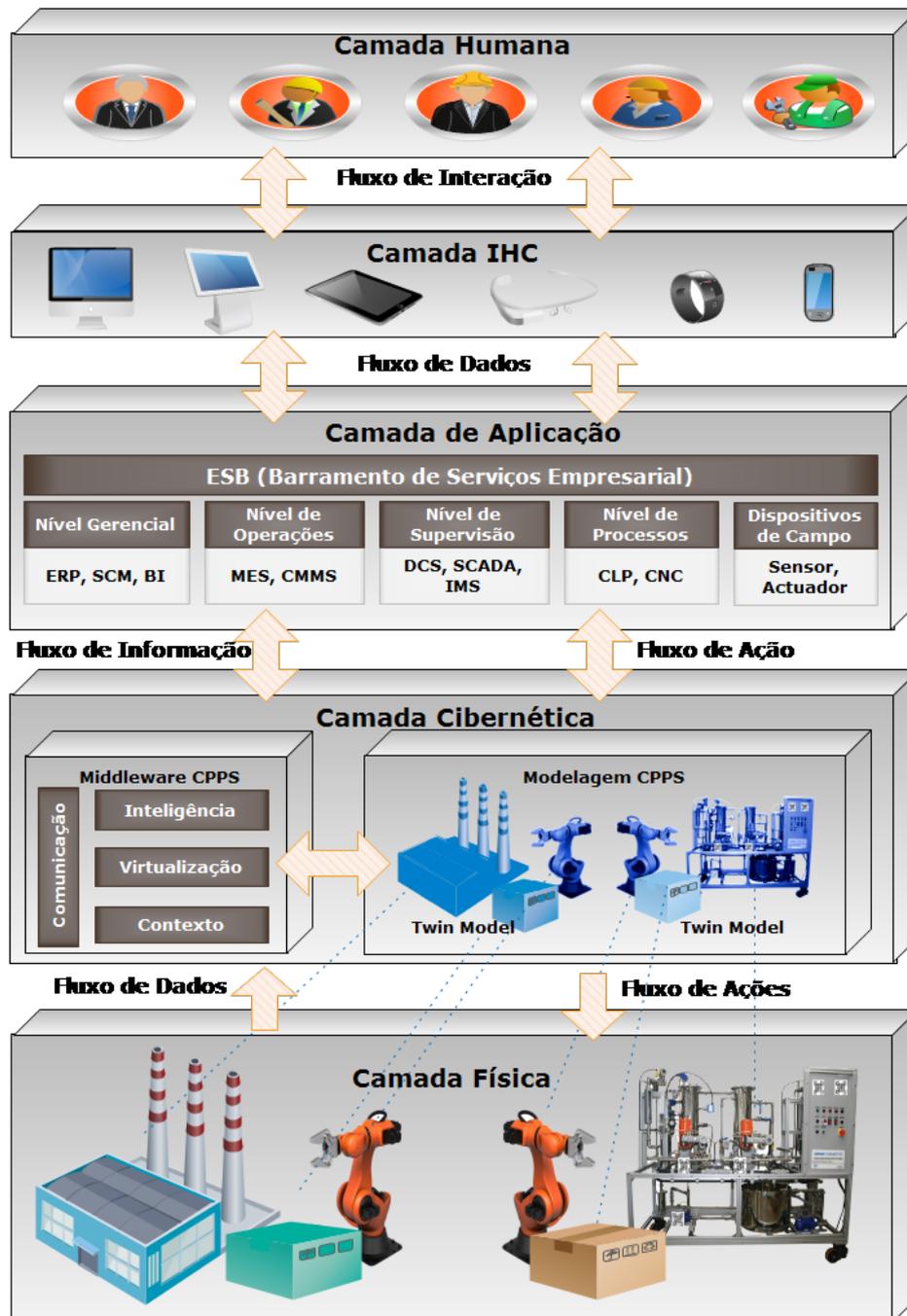


Figura 27: Camadas da Arquitetura do Sistema Ciberfísico de Produção - CPPS

do CPPS. Entre esses dispositivos pode-se enumerar os computadores, monitores interativos, terminais HMI, dispositivos móveis, dispositivos vestíveis - wearables (óculos inteligente, relógios, etc) e interfaces de computação. Através da camada de HCI, o CPPS pode fornecer informações relevantes para a tomada de decisão dos agentes humanos. Da mesma forma, essas interfaces podem ser utilizadas para a obtenção de feedback desses agentes, para a otimização do comportamento do sistema, considerando a experiência humana e seu conhecimento. Interfaces multimodais, baseadas em realidade virtual também podem ser utilizadas para fornecer novas perspectivas, através da criação de ambientes de simulação, facilitando a realização de treinamentos e capacitação. Interfaces baseadas em realidade aumentada podem apresentar informações sobrepostas no ambiente real, orientando a execução segura de rotinas de manutenção, supervisão, inspeção, entre outras. A mistura de componentes reais e virtuais através da camada de HCI busca facilitar a interação e tornar intuitivo o acesso, uso e manipulação da informação.

- Camada de Aplicação: é constituída por sistemas computacionais com funcionalidades específicas e inseridos nos diferentes níveis de gestão (como ERP, MES, SCM, IMS, DCS, etc). Esses sistemas devem atuar de modo integrado, segundo o paradigma CPPS, implementável, por exemplo, através de barramento de serviços empresariais (ESB). O ESB é formado por um conjunto de tecnologias que viabilizam a integração de aplicações, como web services, protocolos de redes industriais e de IoT. Nessa camada também estão incluídos alguns dos sistemas embarcados em dispositivos inteligentes. A integração de sistemas baseada no CPPS deve fornecer os mecanismos necessários para a conexão com a camada cibernética, viabilizando os fluxos de dados e ações.
- Camada Cibernética: é uma camada formada pelo middleware (um sistema intermediário, que integra as informações do domínio físico, virtual, humano e de produção) e o ambiente de modelagem do CPPS. O middleware é um sistema composto de módulos de comunicação, inteligência, virtualização e contexto que servem para integrar as informações das demais camadas em um modelo físico-cibernético. A modelagem CPPS na camada cibernética é uma representação virtual da fábrica, um modelo gêmeo (twin-model) (LEE; BAGHERI; KAO, 2015), que reflete a estrutura física da planta, incluindo os processos executados, as operações realizadas sobre os materiais para a concepção dos produtos, entre outros aspectos. Esse modelo é obtido através de um conjunto de atividades, que envolvem a representação topológica, semântica e a conexão com dados adquiridos por meio de redes de sensores. A camada cibernética tem por objetivo, constituir uma base para a otimização da configuração da planta, possibilitando a melhoria/aprimoramento dos processos em todos os níveis e o desenvolvimento do comportamento autônomo do sistema. A

representação virtual da planta física através do modelo cibernético da planta, irá prover um modelo gêmeo virtual não só dos dispositivos físicos mas dos comportamentos e ações que acontecem sobre a planta. Qualquer alteração no modelo físico deve ser refletido no modelo virtual e vice-versa.

- **Camada Física:** formada por todos os elementos físicos que constituem a topologia da planta, desde instalações, máquinas, equipamentos, materiais, suprimentos até os próprios produtos. A camada física, para integrar virtualmente as ações comportamentais, deve ser modelada e representada na camada cibernética através de um modelo topológico. As conexões da camada física com as demais camadas se dão através de redes de sensores e atuadores. Os sensores fornecem dados do ambiente físico para o CPPS, enquanto os atuadores recebem comandos e instruções para alterar os processos físicos, controlando a execução dos processos.

O foco deste trabalho é explorar a camada cibernética dos sistemas ciberfísicos de produção, mais especificamente os módulos middleware e modelagem CPPS desta camada.

4.2 Camada Cibernética - Modelagem CPPS

Considerando um modelo uma representação a respeito do conhecimento que se tem sobre algo, conclui-se que quanto maior o conhecimento a respeito de um processo, melhor é a capacidade de representação de um modelo deste processo. Desta forma, a modelagem CPPS é fundamental e visa a construção de um modelo ciberfísico, onde os elementos reais da planta industrial, bem como, sua dinâmica comportamental, são representados em um modelo virtual da fábrica.

O modelo ciberfísico, ou modelo gêmeo (*twin model*), definido por (LEE; BAGHERI; KAO, 2015) é uma representação do mundo real, contendo as instâncias dos componentes presentes nos domínios do CPPS (vide figura 28). Esse modelo integra as informações do ambiente real com as informações virtuais, trazendo uma visão panorâmica dos elementos da planta, suas propriedades e comportamentos.

O domínio físico é o mundo real, o hardware, a estrutura física (instalações, equipamentos, materiais e processos físicos, etc) da composição da planta industrial. Já o domínio virtual é formado pelos componentes de software, como os sistemas computacionais que possibilitam o gerenciamento e controle das informações dos dispositivos dos demais domínios. O domínio humano, por sua vez, é constituído pelas pessoas, suas habilidades e capacidades. Finalmente, o domínio de produção é formado pelos elementos específicos da manufatura, como os processos produtivos, os métodos e todo contexto orientado pela engenharia de produção.

O processo de modelagem CPPS, representado na figura 29, passa pela realização de

DOMÍNIOS DO CPPS

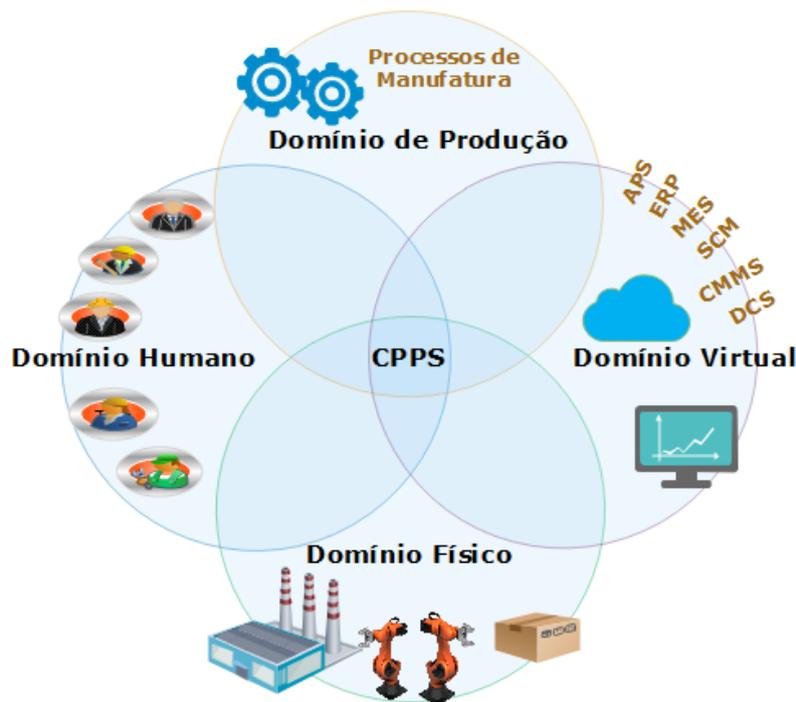


Figura 28: Domínios do CPPS - Fonte: Elaborado pelo autor

três atividades fundamentais: descrever a topologia, integrar a semântica e associar os componentes físicos com os dados obtidos do mundo real. Ao fim de cada uma dessas atividades tem-se como resultado um modelo topológico, semântico e ciberfísico, obtidos em cada uma das atividades respectivamente.

A primeira etapa (atividade) do processo de modelagem CPPS, é a construção de um modelo topológico. O modelo topológico é um modelo hierárquico que serve para representar a composição da planta, descrevendo as instalações, máquinas e equipamentos com seus respectivos componentes e subcomponentes. Essa representação pode conter várias classes de componentes, sendo que cada classe pode apresentar atributos ou propriedades. Nesse modelo também são definidos os parâmetros estáticos (ou constantes), os parâmetros dinâmicos (adquiridos da planta através de sensores), assim como os parâmetros de operação (limites, set-point, intervalo, processos, etc).

Na segunda etapa obtêm-se o modelo semântico que é o resultado do relacionamento das classes e propriedades do modelo topológico com conhecimentos expressos através de referências semânticas, como as ontologias. As ontologias fornecem uma especificação de um conjunto de conceitos e termos dentro de um determinado domínio do conhecimento, possibilitando a realização de inferências.

O modelo ciberfísico é a fusão entre o modelo topológico, semântico e os dados dinâmicos, adquiridos através de redes de sensores e atuadores. Esse modelo ciberfísico

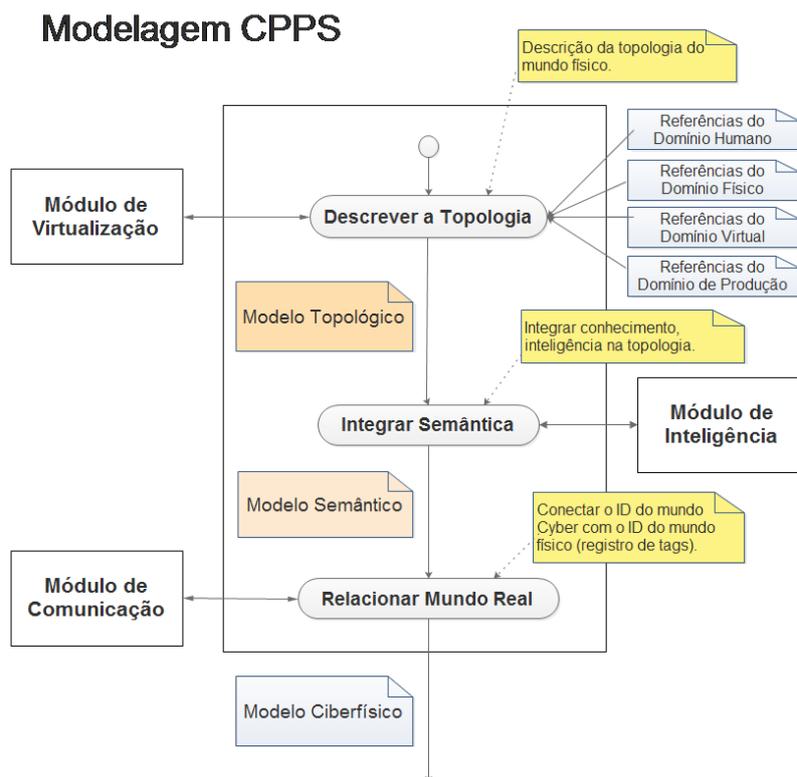


Figura 29: Processo de Modelagem CPPS

possui um comportamento dinâmico, fornecendo uma representação virtual que reflete o status dos elementos físicos do ambiente real. Os componentes de controle e atuação, presentes nesse modelo, devem possibilitar o ajuste e monitoramento do sistema como um todo. O modelo ciberfísico é uma espécie de cópia virtual do mundo físico.

Uma vez constituído esse modelo virtual da fábrica, é possível a realização de uma análise multidimensional dos vários aspectos da atividade produtiva, habilitando a criação de snapshots (geração de dados históricos) que ilustram o comportamento das máquinas e desenvolvimento dos processos ao longo do tempo.

Uma representação da perspectiva multinível, que pode ser representada desse modelo está ilustrada na figura 30, sob a forma de uma diagrama de Venn. O modelo topológico deve possuir um nível de detalhamento adequado e relevante, trazendo uma visão holística das relações entre os recursos disponíveis.

Os estados que as propriedades representadas no modelo topológico podem assumir, devem ser delimitados com seus respectivos parâmetros, de modo que o CPPS possa utilizar essas informações para gerenciar a configuração da planta, gerar alarmes ou identificar possíveis erros ou alterações do sistema.

Atualmente, existem alguns padrões baseados em XML (eXtensible Markup Language) que possibilitam a implementação do modelo topológico. Um desses padrões é

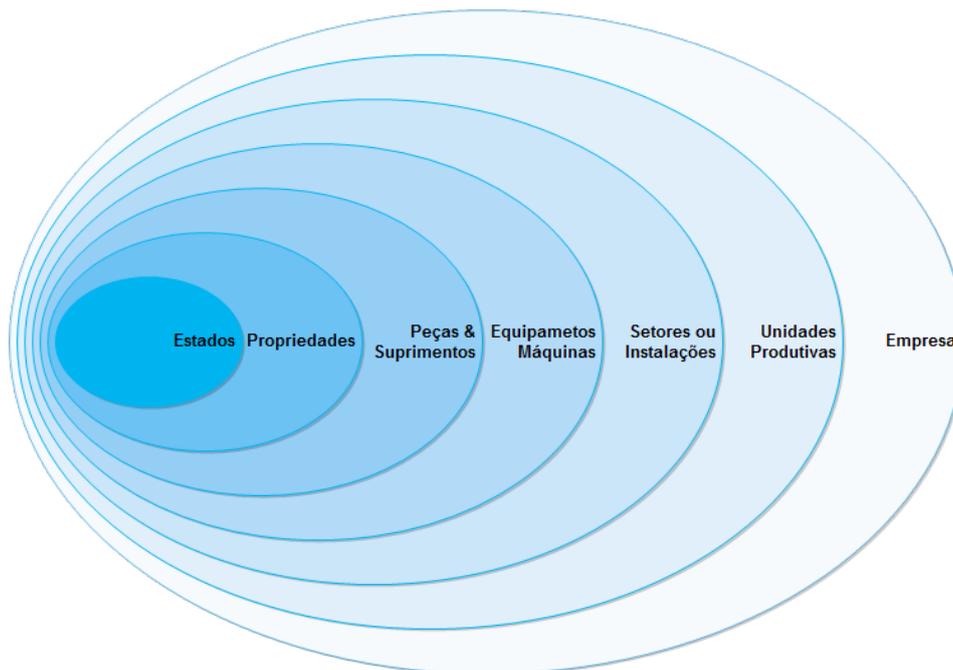


Figura 30: Modelo Topológico - Perspectiva Física

o B2MML (Business To Manufacturing Markup Language), que implementa os conceitos definidos pelo modelo de referência ISA-95 (IEC/ISO 62264).

O padrão B2MML foi desenvolvido para possibilitar a integração de sistemas gerenciais, como ERP, SCM, MES, e é disponibilizado pelo MESA (Manufacturing Enterprise Solutions Association) sob uma licença livre de royalties. É interessante observar a presença de elementos dos domínios humano, de produção e físico.

O conjunto de esquemas formalizados pelo B2MML não apresenta elementos específicos para descrever sistemas, mas destaca a importância do gerenciamento de processos e de informações, atividade alvo dos sistemas. Dessa forma ele faz uma alusão indireta a esses elementos do domínio virtual.

O modelo de referência ISA-95 descreve uma terminologia para a criação do modelo topológico, especificando os elementos necessários para representação dos recursos da planta. O B2MML implementa esses modelos através de esquemas XML, baseados no World Wide Web Consortium's XML Schema language (XSD). Algumas empresas de softwares gerenciais, como a SAP implementam interfaces para compartilhar e reutilizar modelos especificados nesse padrão.

Outro padrão interessante para a criação do modelo topológico é o AML (Automation Markup Language). O AML é um padrão baseado em XML, similar ao B2MML, que define um conjunto de elementos para a criação do modelo topológico, baseado em uma estrutura hierárquica. Esse padrão é OpenSource, e conta com um conjunto de elementos mais específico para a modelagem de sistemas automatizados.

O AML também conta com elementos para a especificação de processos, e pode ser utilizado como base para especificar parâmetros de configuração de CLPs. Os parâmetros

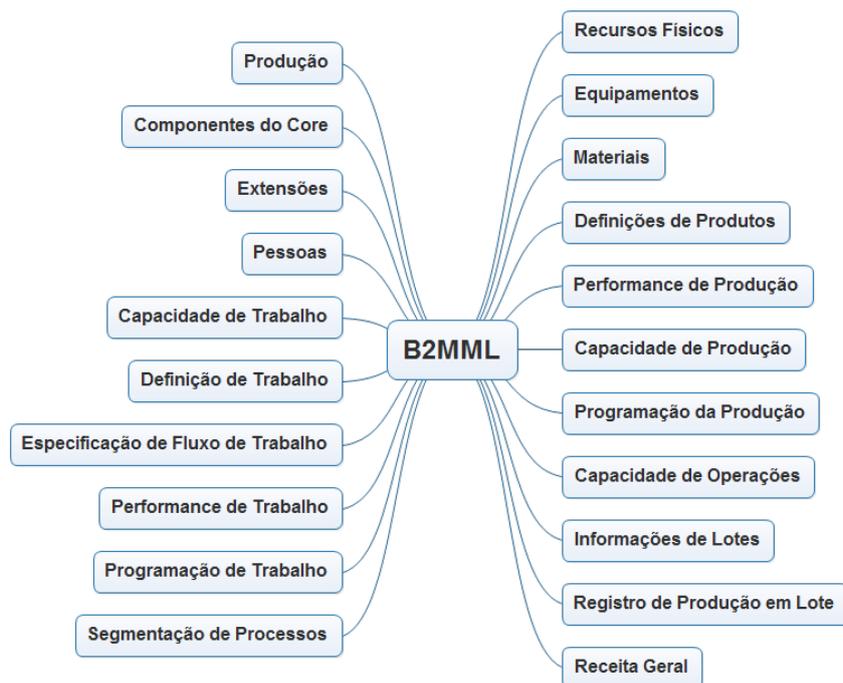


Figura 31: Modelo Topológico - Elementos descritos nas especificações do B2MML (Fonte: elaborado pelo autor)

mapeados em AML podem ser compatibilizados com protocolos industriais de comunicação M2M, como o OPC-UA (OPC Unified Architecture).

O padrão também viabiliza a representação de relacionamentos, relações e referências a outros documentos. Outro diferencial do AML é a possibilidade de relacionar o modelo topológico com modelos tridimensionais, no formato COLLADA.

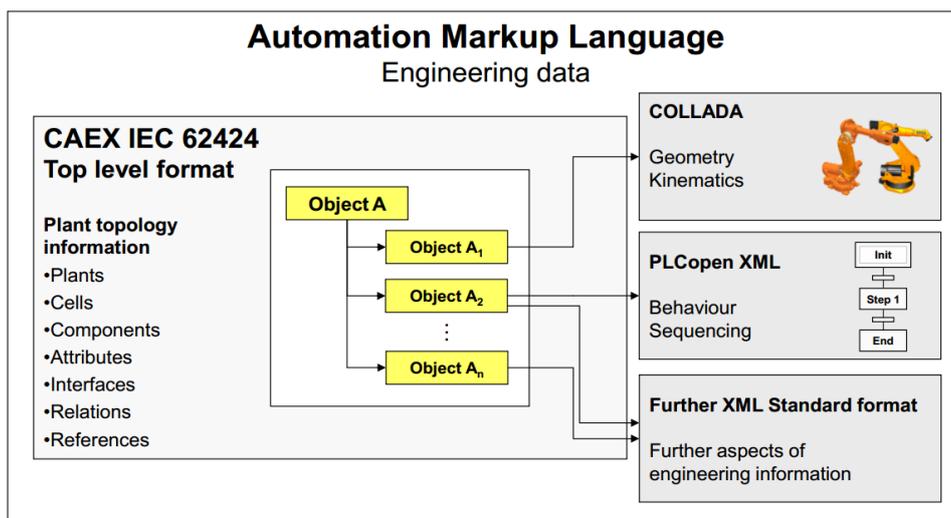


Figura 32: Modelo Topológico - AutomationML (Fonte: AutomationML Consortium)

A segunda etapa é a geração do modelo semântico, que é obtido através do relacionamento entre os elementos do modelo topológico com o conhecimento representando

através de ontologia. Uma ontologia é um modelo de dados que representa um conjunto de conceitos dentro de um domínio do conhecimento e seus relacionamentos, habilitando a capacidade de inferência sobre os objetos presentes no domínio (GRUBER, 1993; CALHAU, 2011).

Nessa etapa, o modelo topológico ganha um comportamento semântico e os seus elementos podem ser analisados sobre diferentes perspectivas, através dos relacionamentos e propriedades definidas na ontologia. Existem diferentes tipos de ontologias: ontologias de alto nível, de domínio, de atividades e aplicação, que podem ser conectadas para ampliar o sentido semântico dos termos especificados na topologia. O módulo de inteligência no Middleware CPPS é responsável pela inserção semântica no modelo topológico.

O objetivo do modelo semântico é ampliar o significado da informação que está contida no modelo topológico. O modelo topológico é basicamente um modelo hierárquico, enquanto o modelo semântico agrega conhecimento aos seus elementos, através de relacionamentos ou especificações descritas nas ontologias. Uma ontologia pode fazer referência a termos comuns a outras ontologias, o que cria uma rede de conhecimentos em torno de um conceito, que pode ser utilizada pelo CPPS para interpretar e relacionar dados de forma mais eficiente.

O ser humano é capaz de utilizar o conhecimento e experiência que possui na interpretação dos fatos e eventos percebidos no ambiente por meio de seus sentidos. Já os sistemas computacionais, dependem de sensoriamento para reproduzir essa aquisição de percepções do ambiente, faltando ainda modelos computacionais para reproduzirem o processo de cognição, atuação e tomada de decisão autônoma. As ontologias, no contexto da computação, são estruturas de dados organizados na forma de grafos, que permitem montar o conhecimento comum sobre um determinado domínio de forma organizada e passível de interpretação pelo computador, podendo posteriormente auxiliar na automação do conhecimento de máquinas.

Dentre as possíveis aplicações do modelo semântico, podemos citar a criação de interfaces semânticas para usuários humanos, apresentando informações relacionadas a um determinado equipamento, sob diferentes perspectivas, como os processos de manutenção, rotinas de testes e configurações. O mesmo processo pode ser utilizado para a realização de inferências sobre os dados históricos dos equipamentos, facilitando a localização de falhas e problemas sistêmicos.

A terceira etapa da modelagem CPPS consiste na conexão do modelo topológico com o modelo semântico. Os dados adquiridos do ambiente real, por meio de redes de sensores e atuadores são integrados ao modelo topológico e analisados pelo modelo semântico. Essa conexão gera um modelo ciberfísico, onde o comportamento físico dos componentes do mundo real é representado em um modelo virtual, cujo alguns autores referem-se como twin-model (modelo virtual gêmeo da planta física). Esta etapa da modelagem se dá através dos componentes do módulo de comunicação do Middleware CPPS descritos

posteriormente.

O objetivo da modelagem CPPS é gerar o modelo ciberfísico que represente virtualmente e temporalmente todo o processo industrial sob diferentes perspectivas (topológico, semântico, comportamental, físico etc). O monitoramento e manipulação do estado das variáveis desse modelo deve originar ações de controle executadas por meio dos atuadores. A partir desse ponto, o modelo ciberfísico adquire um comportamento dinâmico visando o controle e otimização da planta/fábrica como um todo.

4.3 Camada Cibernética - Middleware CPPS

O Middleware CPPS, representado na figura 33, é a proposta de um sistema que atua na mediação dos componentes dos domínios físico, humano, virtual e de produção presentes no ambiente de manufatura. A principal função desse componente é estabelecer a comunicação entre o modelo virtual e os equipamentos físicos baseado no modelo ciberfísico gerado pela modelagem CPPS da camada cibernética.

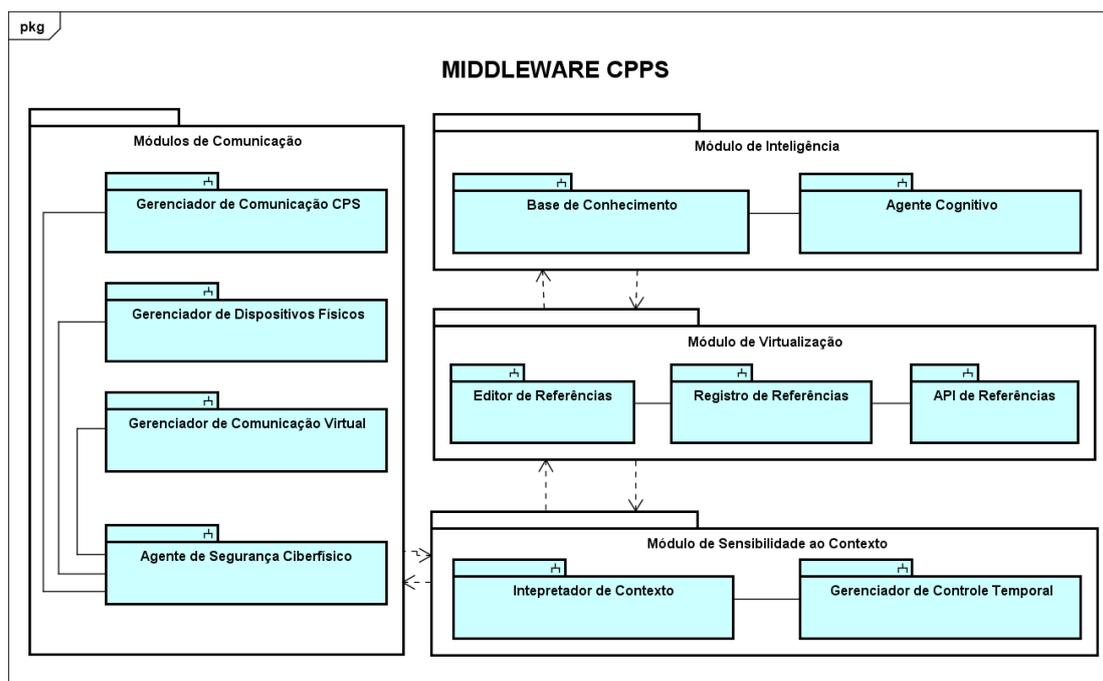


Figura 33: Middleware CPPS - Sistema Integrador de Domínios do CPPS

O middleware deve fornecer a estrutura básica, tanto para a concepção do modelo ciberfísico, como para a manipulação e controle otimizado do processo produtivo. Entre as funções do middleware tem-se a integração de sistemas através do barramento de serviços empresariais (ESB) para interação com outras aplicações utilizadas no ambiente fabril.

Segundo alguns autores o CPS é um sistema da categoria "sistema de sistemas", o que significa que deve possuir recursos de comunicação com diferentes sistemas e dispositivos. Da mesma forma, ele deve possuir os mecanismos necessários para o desenvolvi-

mento do processo de virtualização do processo e da planta industrial.

Visando a redução da complexidade do middleware, dividiu-se a especificação por funcionalidades descritas em quatro módulos: módulo de comunicação, módulo de sensibilidade ao contexto, módulo de virtualização e módulo de inteligência. Cada módulo possui um conjunto de componentes, e cada componente possui uma função específica que atende aos requisitos dos sistemas ciberfísicos.

A figura 33 retrata a estrutura desse middleware, os módulos e seus respectivos componentes. Na sequência apresenta-se uma descrição de cada um desses módulos e suas funcionalidades.

4.3.1 Módulo de Comunicação

O módulo de comunicação é o responsável por estabelecer a conexão com os diferentes elementos do CPPS direcionando os fluxos de dados e ações de controle. Dessa forma, deve ser capaz de gerenciar sessões simultâneas de diversos agentes, sincronizando as interações com segurança.

As interações que ocorrem dentro do CPPS são disparadas pelos agentes que pertencem a um dos quatro domínios descritos anteriormente (humano, virtual, físico e de produção). Dessa forma, o módulo de comunicação deve ser capaz de organizar as requisições desses agentes, otimizando o fluxo de dados tanto para a concepção do modelo ciberfísico quanto para o controle dos processos monitorados.

Para operacionalizar essas funcionalidades, definimos quatro componentes: o gerenciador de dispositivos físicos, o gerenciador de comunicação virtual, o gerenciador de comunicação CPPS e o agente de segurança ciberfísico.

- Gerenciador de Dispositivos Físicos: é o componente que possibilita que dispositivos físicos sejam integrados diretamente ao CPPS. Com a expansão da IoT, novos dispositivos devem ser inseridos no ambiente fabril. Entre esses dispositivos, temos novos sensores, atuadores, robôs, microcontroladores, entre outros, que vão proporcionar diferentes interações com o meio físico. Dessa forma, o gerenciador de dispositivos físicos deve conter uma ampla biblioteca de drivers para suportar vários protocolos de comunicação, não só de redes industriais, mas de componentes sob o paradigma IoT.

O diagrama de classes representado na figura 34, ilustra algumas das classes de uma possível estrutura para a implementação desse módulo. Os dispositivos integrados ao CPPS possuem entradas e/ou saídas, e essas, por sua vez possuem parâmetros, ou definições de funcionamento. Alguns dispositivos podem possuir serviços, através dos quais suas funcionalidades podem ser compartilhados. O gerenciador de dispositivos também deve ser capaz de gerenciar as requisições realizadas sobre os serviços compartilhados, e isso é operacionalizado através do controle de status

desses serviços.

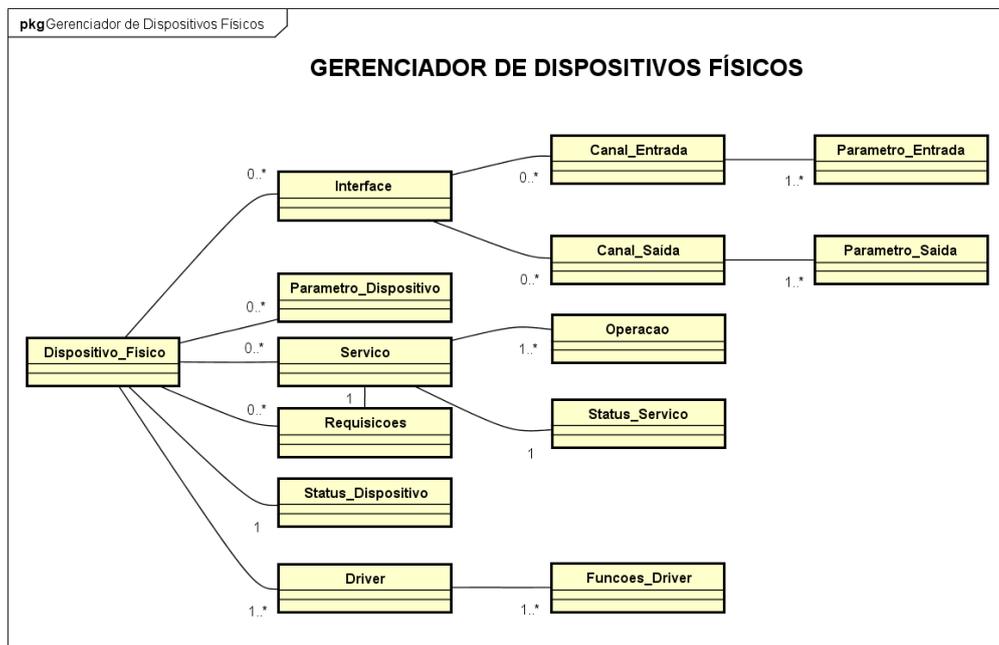


Figura 34: Middleware CPPS - Gerenciador de Dispositivos Físicos

- Gerenciador de Comunicação Virtual: é o responsável pela comunicação com as aplicações que já são utilizadas nos níveis de gerenciamento (ERP, MES, SCADA, IMS, etc).

Atualmente, a integração entre aplicações distribuídas é realizada principalmente por meio de webservices utilizando os padrões SOAP e REST. O gerenciador de comunicação virtual deve ser capaz de interagir com os serviços disponíveis através de webservices, provendo mecanismos de descoberta e configuração dos parâmetros desses serviços.

O gerenciador se utiliza do barramento de serviços empresariais (ESB) para promover a integração vertical, mas também deve ser capaz de consumir serviços relacionados a integração horizontal (colaboração entre empresas), dado o crescente número de serviços disponibilizados através da internet que também podem contribuir no desdobramento das operações da fábrica.

- Gerenciador de Comunicação CPS: de modo geral, o CPS é um sistema que centraliza grande parte da responsabilidade do ambiente de produção. Entretanto, ele também deve ser capaz de interagir com outros CPSs.

Atualmente, não foi definido um protocolo de comunicação específico para a troca de mensagens entre CPSs, entretanto, já existem iniciativas visando a definição de padrões e diretivas para a sua implementação. O CPS também deve possuir meca-

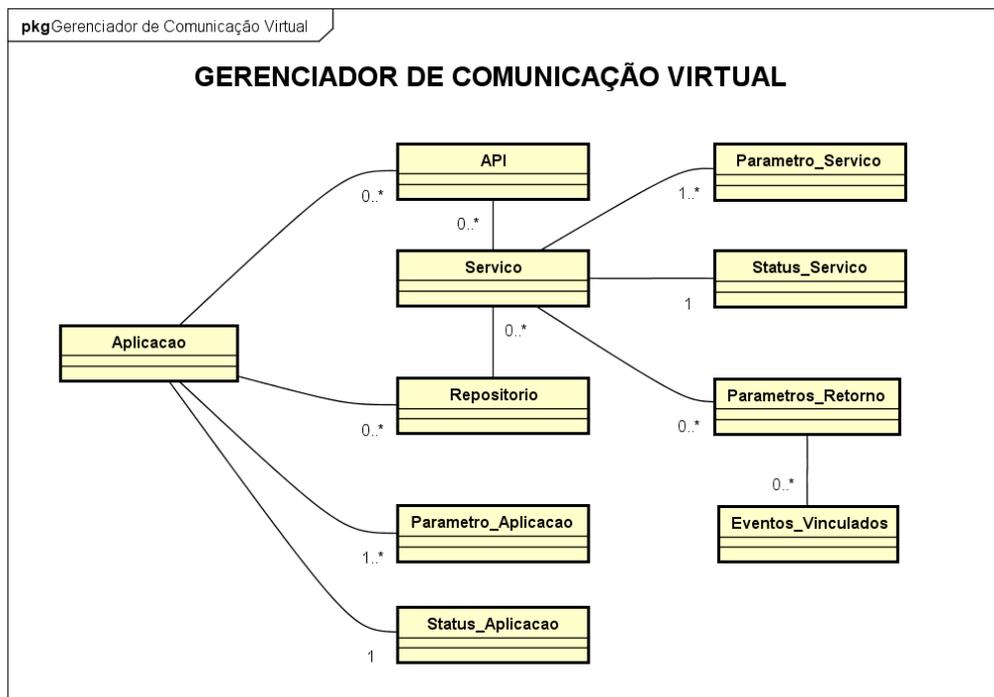


Figura 35: Middleware CPPS - Gerenciador de Comunicação Virtual

nismos para promover o compartilhamento de informações com outras aplicações CPS, visando a reutilização dessas informações por outras aplicações.

Entre algumas das informações relevantes que podem ser compartilhadas, inclusive com a rede de parceiros de negócios, inclui-se as necessidades de suprimentos e peças de reposição, que fazem parte da estratégia de integração horizontal da cadeia de suprimentos (supply chain).

O gerenciador de comunicação CPS tem um funcionamento similar ao gerenciador de comunicação virtual, entretanto, o foco é a integração com outros sistemas ciberfísicos, como por exemplo o CPS-H (um sistema ciberfísico focado na atuação humana), o CPS-E (sistema ciberfísico aplicado ao monitoramento de áreas de risco ou em emergências), o CPS-T (aplicação do CPS nos transportes), entre outros.

- **Agente de Segurança Ciberfísico:** é o componente responsável pela segurança das sessões, trocas de mensagens e interações entre os agentes internos e externos do CPPS, realizando as autenticações e validações necessárias para estabelecer conexões seguras entre eles.

O agente de segurança deve ser capaz de identificar dispositivos e requisições nocivas ao sistema, atuando de modo similar a sistemas de detecção de intrusos (IDS). Ele deve fornecer mecanismos para estabelecer regras de acesso personalizadas para os agentes dos domínios de produção, humano, virtual e físico, suportando múltiplos níveis ou perfis de acesso.

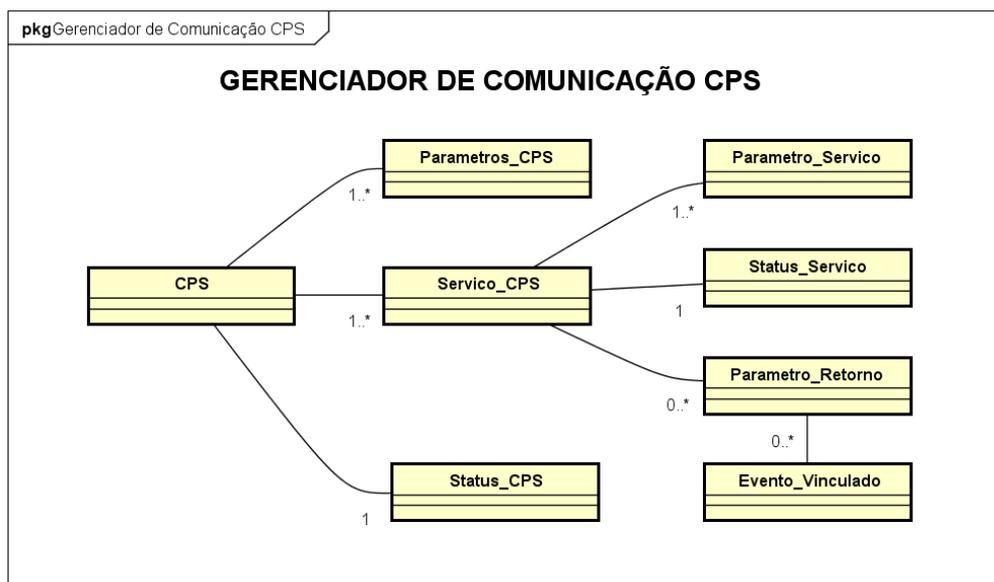


Figura 36: Middleware CPPS - Gerenciador de Comunicação CPS

4.3.2 Módulo de Sensibilidade ao Contexto

O módulo de sensibilidade ao contexto visa a seleção da informação útil e sua aplicação no momento oportuno baseado na modelagem ciberfísica da planta/processo. Isso pode ser realizado através de mecanismos de detecção do contexto, ou seja, a identificação da situação do agente que está solicitando uma determinada informação, baseando-se na sua localização, atuação e requisitos.

A detecção do contexto habilita a customização da informação, de modo que o CPS retorne o que for mais relevante para cada requisição, contribuindo para o desdobramento das ações relacionadas. A análise de contexto também deve considerar permissões de acesso e restrições de segurança.

Esse módulo está estruturado em dois componentes: o interpretador de contexto e o gerenciador de controle temporal. O primeiro componente é o responsável pela análise de contexto, o segundo é o responsável pelo sincronismo entre as requisições que chegam ao CPS com as demais operações realizadas pelos módulos (inteligência, virtualização).

- **Interpretador de Contexto:** é o componente que executa a análise de contexto sobre as requisições do CPS, estabelecendo as rotas para as requisições entre os módulos de virtualização e comunicação. Baseado nos resultados da análise, o interpretador encaminha o conteúdo da requisição para as referências do módulo de virtualização.
- **Gerenciador de Controle Temporal:** o gerenciador de controle temporal é o responsável pelo sincronismo entre as operações do middleware CPPS e o modelo ciberfísico. No mundo físico, ou analógico, a maioria dos eventos ocorre no tempo contínuo. Entretanto, os computadores trabalham com o tempo discreto, uma forma

de representação de tempo do mundo digital. O sincronismo entre os eventos do mundo real e virtual é crucial para o bom funcionamento do CPPS.

A análise de contexto, representada na figura 37, é realizada através do interpretador de contexto. O interpretador deve buscar respostas para algumas perguntas sobre o elemento analisado, de modo a identificar esse elemento, situando sua localização, status, termos relacionados, requisitos, etc.

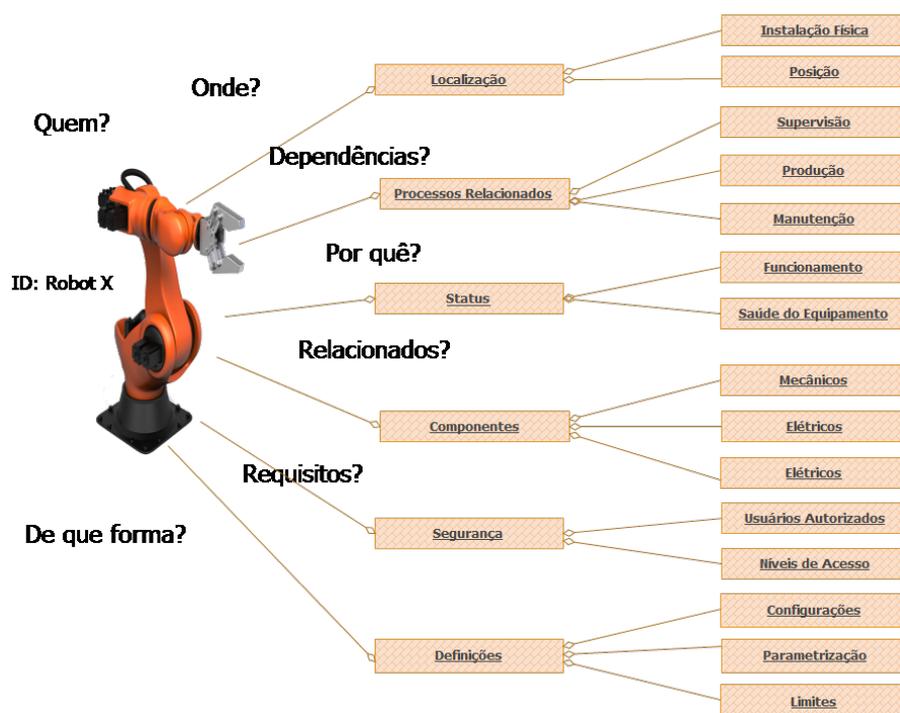


Figura 37: Middleware CPPS - Análise de Contexto

Por exemplo, quando um agente humano enviar um comando para desligar um equipamento, o interpretador de contexto deve identificar o usuário, sua localização, o equipamento, a operação solicitada, assim como os requisitos de segurança e definições previamente estabelecidas. Se o usuário possuir permissões de controle sobre o equipamento e os demais processos relacionados não forem prejudicados, o equipamento é desligado com segurança.

Em uma linha de produção, os equipamentos devem ser desligados em uma sequência específica, de modo a evitar falhas e acidentes. Caso existam restrições para a execução da operação solicitada, o usuário é notificado através da HCI, podendo selecionar opções alternativas.

O módulo de sensibilidade ao contexto também deve contribuir para a melhoria das interfaces da camada de interação humana (HCI), na medida em que reúne as informações do contexto do usuário, possibilitando o desenvolvimento de interfaces mais inteligentes e personalizadas.

4.3.3 Módulo de Virtualização

O módulo de virtualização é o módulo responsável pela representação virtual da fábrica. Esse módulo deve possuir os componentes que possibilitem a implementação do modelo topológico e o registro de suas referências nos domínios humano, físico, virtual e de produção.

Como já descrito na seção (vide figura 29), a descrição da topologia é uma tarefa ligada ao módulo de virtualização. Dessa forma, o módulo deve fornecer os recursos para a concepção do modelo topológico.

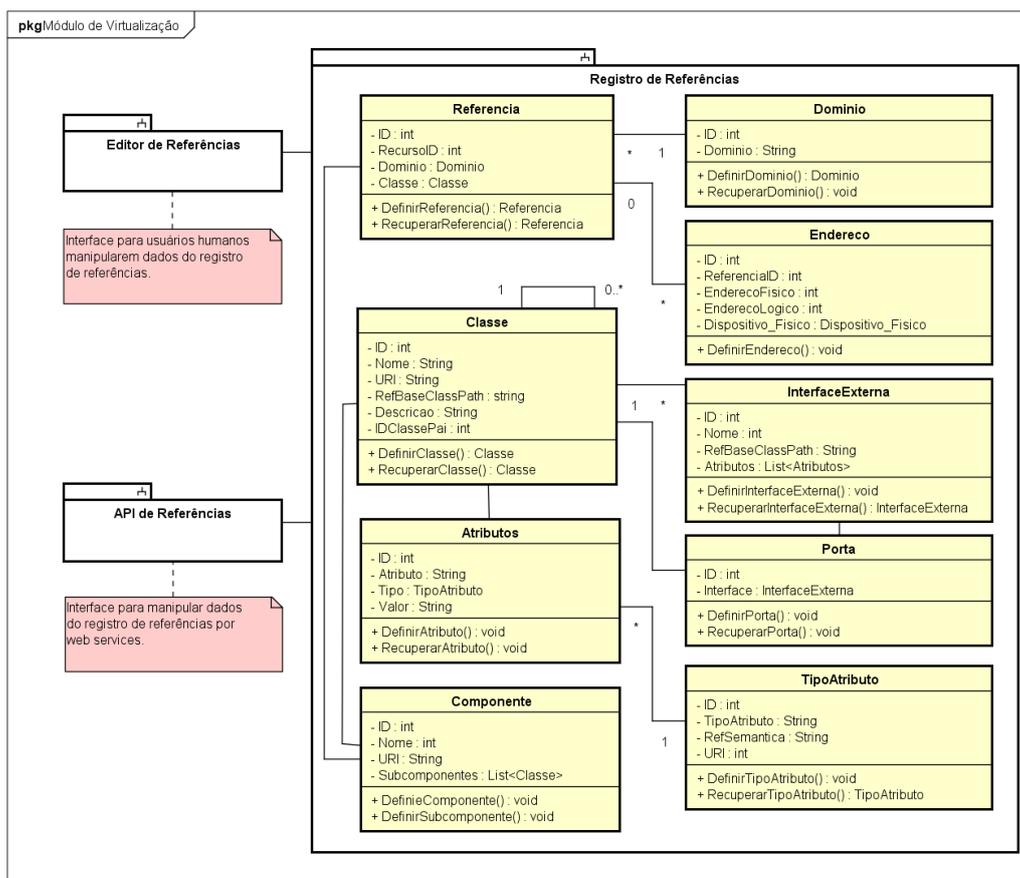


Figura 38: Middleware CPPS - Módulo de Virtualização

O módulo de virtualização, representado na figura 38 serve para viabilizar a especificação e representação de componentes da planta, registrando as instâncias desses componentes numa espécie de base de dados. De modo similar ao que ocorre nos sistemas operacionais, o CPS deve ser capaz de registrar os recursos disponíveis de modo organizado. Isso é realizado no módulo de virtualização, através das referências. As referências são as informações sobre os recursos de cada domínio registrados e catalogados, possibilitando a consulta e reutilização desses dados na criação do modelo ciberfísico.

- **Referências do Domínio Virtual:** é o registro de todos os recursos virtuais disponíveis no sistema, como outros sistemas integrados, web services, APIs e suas fun-

cionalidades. Algoritmos e modelos matemáticos, assim como outros documentos virtuais ou digitalizados, que podem ser interpretados ou processados por computadores também podem ser referenciados e utilizados como referências virtuais.

- **Referências do Domínio Físico:** registro de todos os recursos físicos disponíveis na fábrica, como as instalações, máquinas, equipamentos, peças, suprimentos, assim como a matéria-prima e os produtos físicos.
- **Referências do Domínio Humano:** registro dos elementos do domínio humano (pessoas, habilidades, cargos, funções, processos humanos, atividades humanas, etc). O ser humano é um recurso com várias habilidades, entre elas a capacidade de analisar situações complexas e tomar decisões durante a execução do processo devido a experiência e conhecimento. Por esse motivo, no contexto da Indústria 4.0, a atuação humana é muito relevante e conseqüentemente implica em métodos de aquisição do conhecimento especialista humano para embarcar em dispositivos. As referências do domínio humano são importantes para aperfeiçoar a interação humano-máquina, tornando as máquinas mais inteligentes e capazes de colaborar com os seres humanos.
- **Referências do Domínio de Produção:** registro dos elementos de produção, como os processos produtivos, a capacidade produtiva, o controle de qualidade, entre outros. Esses elementos também pertencem ao domínio físico, ou virtual e mesmo humano, formando um subconjunto de informações relevantes para a otimização da tarefa produtiva.

A manipulação dessas referências é realizada através de três componentes: o registro de referências, o editor de referências e a API de referências. O Registro de Referências é uma base de dados formada pelas referências inseridas no CPPS e reúne as coleções de referências dos quatro domínios. Ele fornece os mecanismos de manipulação de referências, sendo equivalente a uma base de dados com todos os componentes da fábrica.

O Editor de Referências é o componente que possui as interfaces para o gerenciamento das referências. O editor serve para que pessoas, devidamente autenticadas e autorizadas manipulem as informações do modelo topológico. Essa ferramenta também pode apresentar recursos de importação e exportação de modelos baseados em AutomationML, B2MML, entre outros formatos suportados por ferramentas de engenharia e modelagem de processos industriais.

Outro componente importante é a API de Referências, que é o componente formado por um conjunto de web services através do qual as referências podem ser manipuladas por agentes de software. Em vários momentos as referências serão manipuladas por agentes de software, e nesses casos, o componente mais apropriado é a API de referências.

4.3.4 Módulo de Inteligência

O módulo de inteligência é formado por dois componentes: a base de conhecimento e o agente cognitivo. O primeiro, serve para armazenar conhecimentos dos quatro domínios (físico, humano, produção e virtual), servindo como base para a formação do modelo semântico, no processo de modelagem CPPS. O segundo componente é responsável pela análise e monitoramento do modelo ciberfísico em execução, identificando padrões, assim como pelo comportamento autônomo do sistema, disparando ações de controle sobre a ocorrência de eventos.

A base de conhecimento atua como um grande repositório de conhecimento sobre os recursos do CPPS. Um determinado domínio do conhecimento pode ser mapeado e representado na forma de ontologias (gerais, de domínio, atividades, aplicação). Nas ontologias são representadas as especificações de materiais, processos, atividades, rotinas, entre outros. Cada elemento descrito na ontologia recebe um identificador URI (Uniform Resource Identifier), uma cadeia de caracteres compacta que permite denominar um recurso. A partir desse identificador, podemos criar conexões entre os recursos do modelo topológico, transformando-o num modelo semântico.

Como já mencionado na seção "Modelagem CPPS", onde foi abordado o modelo semântico, as ontologias são mecanismos de representação do conhecimento e podem ser interpretadas pelos computadores. Dessa forma, parte do conhecimento que normalmente é comum e restrito aos seres humanos, pode ser representado em uma estrutura de dados e interpretado através de algoritmos computacionais.

O conhecimento descrito em ontologias pode ser utilizado para melhorar a forma como o computador percebe e manipula os dados, através dos relacionamentos e regras especificadas entre os termos. A figura 39 ilustra a relação entre o módulo de virtualização e a base de conhecimento do módulo de inteligência. As referências inseridas no registro de referências do módulo de virtualização podem ser relacionadas com as ontologias através das classes, usando a propriedade URI. Os atributos, ou propriedades definidas nessas classes também podem conter referências semânticas, apontando para os recursos definidos em ontologias ou documentos de referência.

Na prática, quando o CPPS analisa um recurso, como um equipamento por exemplo, além de verificar os dados do modelo topológico, as variáveis monitoradas por redes de sensores e atuadores e outras informações dos sistemas integrados ele também pode contextualizar essas informações utilizando as definições das ontologias.

O repositório de ontologias pode ser estruturado de várias maneiras, utilizando diferentes estratégias. Uma dessas estratégias baseia-se no uso de quatro ontologias de domínio, correspondentes aos domínios físico, humano, de produção e virtual. Na sequência, outras ontologias mais específicas podem ser integradas, cobrindo áreas como a manutenção, cadeia de suprimentos, tarefas e assim por diante. Uma ontologia pode fazer referência a outras ontologias, reaproveitando conceitos relacionados que já foram mapeados e

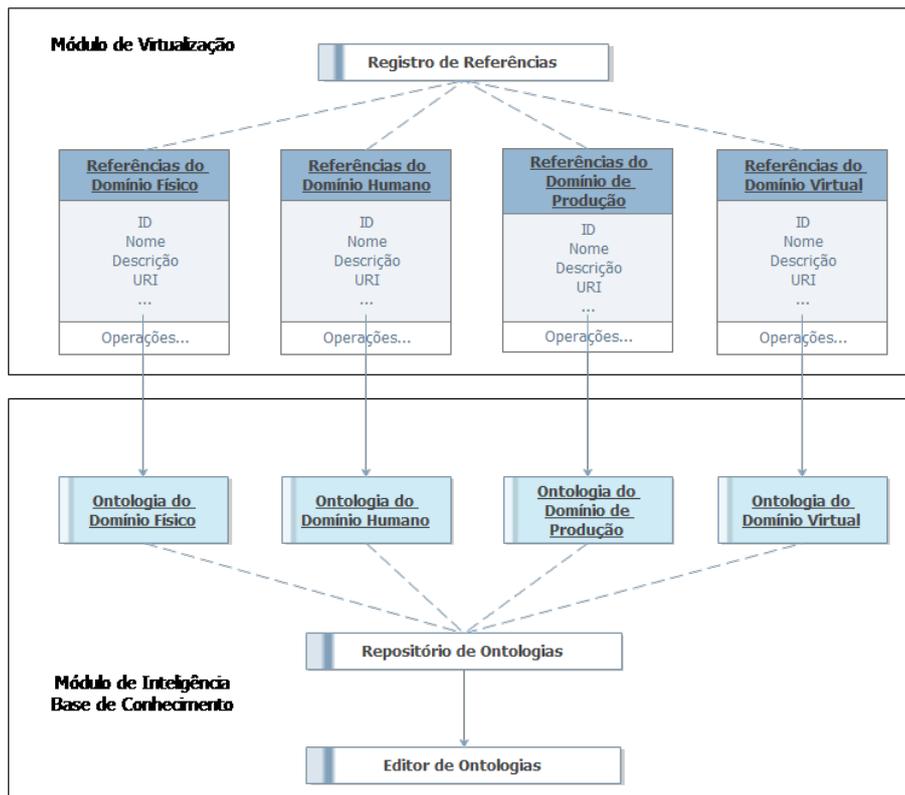


Figura 39: Relacionamento entre o módulo de virtualização e a Base de Conhecimento

formalizados.

O conhecimento baseado em elementos tecnológicos é muito dinâmico, e está em constante evolução. Por esse motivo, a base de conhecimento também deve possuir um editor de ontologias, com as funcionalidades necessárias para a manipulação e atualização das diversas ontologias do repositório.

O segundo componente do módulo de inteligência, descrito no figura 40, é o agente cognitivo. O agente cognitivo é o componente que através de algoritmos de inteligência artificial analisa as referências do módulo de virtualização, detecta a ocorrência de eventos e pode tomar decisão autonomamente disparando ações relacionadas ao processo.

O agente cognitivo pode atuar de duas formas: analisando dados em tempo real, ou verificando dados históricos. A primeira forma de atuação é contínua, e visa a detecção de eventos para a tomada de decisão. A segunda forma é invocada para detectar padrões de comportamento ao longo do tempo, para fins de comparação e otimização do modelo ciberfísico ou para a detecção de padrões, como falhas, por exemplo. O objetivo dessa segunda forma de atuação é viabilizar a evolução do sistema, de modo que ele passe a compreender esses padrões, relacionando-os com os eventos já catalogados no sistema.

O CPPS pode ser configurado para atuar de dois modos: disparando ações automaticamente, dependendo dos eventos percebidos, ou encaminhando as informações desses eventos para que agentes humanos decidam quais medidas devem ser tomadas. O componente que implementa essa configuração nessa arquitetura é o agente cognitivo.

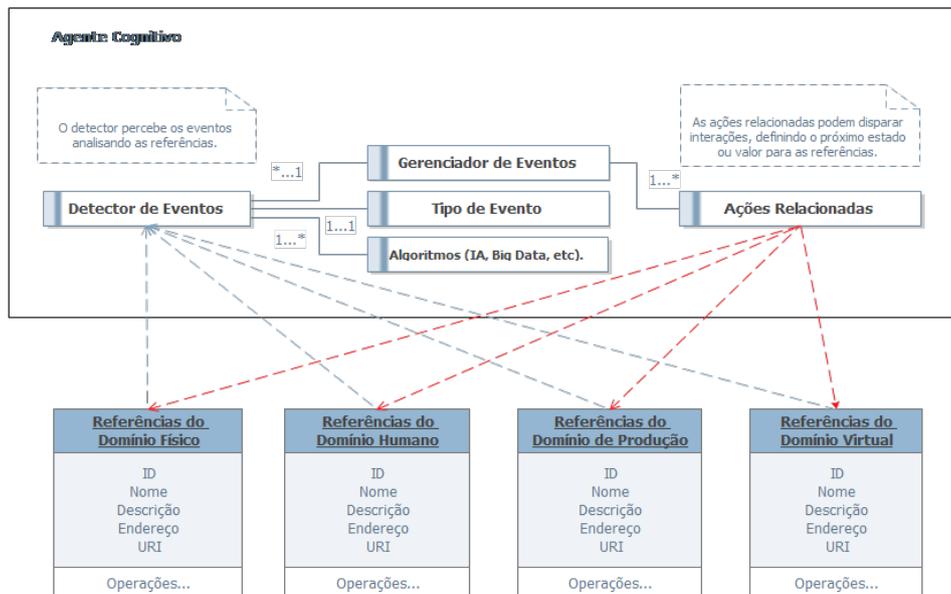


Figura 40: Middleware CPPS - Agente Cognitivo do Módulo de Inteligência

O agente cognitivo é um componente que tem por responsabilidade a detecção de eventos, disparando diversos tipos de ações, denominadas ações relacionadas, que podem ser de atuação, controle, interação com usuários, sistemas, entre outras.

4.4 Considerações

Nesse capítulo foi apresentada uma proposta de arquitetura para sistemas ciberfísicos de produção, baseada nos conceitos discutidos ao longo dos capítulos anteriores.

A arquitetura apresentada é estruturada em cinco camadas: humana, de interfaces ou IHC, de aplicação, cibernética e física. O trabalho descreve cada uma das camadas com seus respectivos componentes, mas focaliza-se no desenvolvimento da camada cibernética, onde é proposta uma abordagem para a modelagem dos elementos da fábrica no ambiente virtual.

Na camada cibernética é proposto o desenvolvimento de um sistema integrador: o Middleware CPPS. Esse sistema deve ser capaz de atuar como mediador entre os recursos utilizados no gerenciamento industrial (pessoas, equipamentos, sistemas, etc), provendo os mecanismos necessários para a implementação do modelo ciberfísico.

O texto apresenta um arranjo entre as diversas tecnologias relacionadas aos elementos dos domínios físico, humano, de produção e virtual. São mencionados e descritos alguns dos componentes para atuar na comunicação, virtualização, sensibilidade ao contexto, virtualização, entre outros aspectos relevantes.

Evidentemente que existem várias lacunas não exploradas ou aprofundadas no texto, dada a abrangência do tema. O Sistema Ciberfísico de Produção é um tema recente, referenciado especialmente no movimento Indústria 4.0 e seu desenvolvimento ainda se

encontra em estágio inicial.

No próximo capítulo, a arquitetura proposta é efetivamente aplicada em dois estudos de caso. O primeiro representa a integração vertical obtida no âmbito do projeto 3DCS-FINEP, onde a arquitetura integra os diferentes níveis de uma planta industrial que simula uma indústria de processos.

O segundo estudo de caso, aplica e valida a proposta no âmbito da integração horizontal dos diferentes agentes associados a cadeia de suprimentos no projeto IMS2SCM.

Ambos experimentos pilotos são realizados em cenários reais, envolvendo diferentes conceitos e tecnologias associadas a Indústria 4.0.

5 ESTUDOS DE CASO: CPPS NA INTEGRAÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL

O presente capítulo tem por finalidade aplicar a arquitetura CPPS e middleware propostos no capítulo anterior em dois estudos de casos. O primeiro estudo de caso é direcionado a integração vertical dos níveis de gerenciamento, integrando aplicações e dispositivos para a geração de interfaces humano-computador baseadas em realidade aumentada.

O segundo estudo de caso aborda estratégias para a promoção da integração horizontal entre os agentes da cadeia de suprimentos de peças de reposição, utilizando como base a previsão da demanda de peças obtida por sistemas inteligentes de manutenção.

5.1 Estudo de Caso 1 - Integração Vertical

A integração vertical é um dos desafios da Indústria 4.0 que visa ampliar as interações entre os recursos dos diferentes níveis do gerenciamento definidos na pirâmide da automação. Nesse estudo de caso, implementa-se uma aplicação com elementos de três níveis: 1) Dispositivos de Campo; 2) Controle e 3) Supervisão. São explorados aspectos como a integração de sistemas, modelagem e virtualização, assim como a aplicação de interfaces humano-computador baseadas em realidade aumentada.

5.1.1 O Cenário e Tecnologias

O cenário de desenvolvimento desse estudo de caso é uma planta industrial de processos químicos, apresentada na figura 42, projetada para fins didáticos. Essa planta didática automatizada é constituída por vários componentes como tanques, bombas, válvulas pneumáticas, CLPs, sensores e atuadores. Esses componentes formam uma estrutura que viabiliza a simulação de processos industriais comuns a várias fábricas.

O estudo de caso foi desenvolvido no âmbito do NAUTEC (Grupo de Robótica e Automação Inteligente) em conjunto com a equipe do projeto 3DCS [COLOCAR SIGLA]. Uma visão geral das ações desenvolvidas e as respectivas tecnologias empregadas estão representadas na figura 41 sob a forma de um diagrama de atividades.

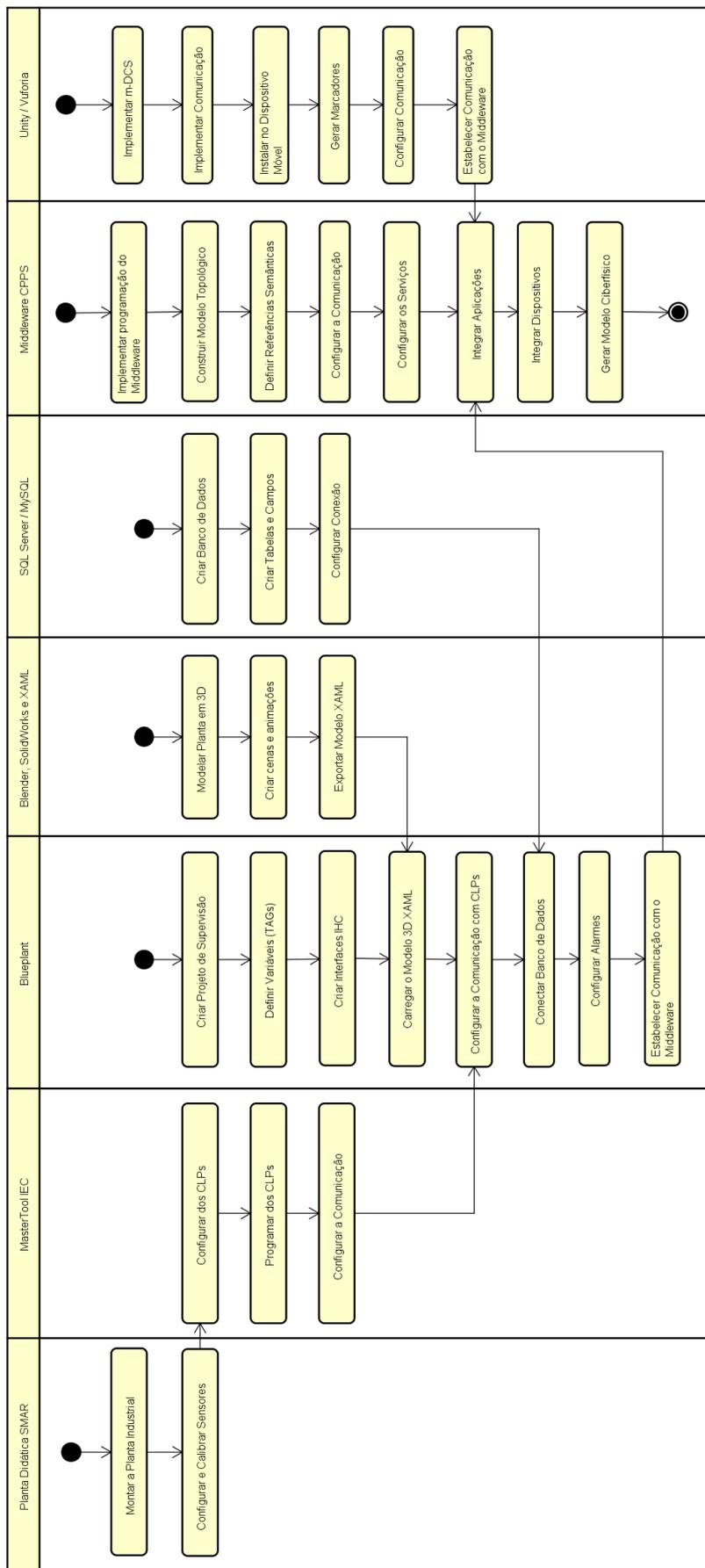


Figura 41: Principais atividades desenvolvidas no estudo de caso de integração vertical



Figura 42: Planta Industrial Didática (SMAR)

A planta industrial foi equipada com controladores lógicos programáveis (CLPs) da série Nexto (vide figura 43) da Altus (Altus Sistemas de Automação S.A.), uma empresa parceira do projeto 3DCS-FINEP. Os equipamentos da Altus são empregados nas mais variadas aplicações de automação, desde máquinas complexas até soluções de engenharia como usinas hidrelétricas, parques eólicos, entre outros. Estes mesmos CLPs também foram empregados nas plataformas petrolíferas responsáveis pela exploração do pré-sal no Brasil.



Figura 43: Barramento com Equipamentos da Série Nexto (Altus - Sistemas de Automação S.A.)

Os CLPs foram programados e configurados através do software MasterTool IEC (Altus), cuja interface está representada na figura 44. Foram implementados os algoritmos de controle responsáveis pelo acionamento de válvulas e aquisição de dados dos sensores da planta industrial.

Os equipamentos foram montados e configurados, de modo a viabilizar o monitoramento e controle da planta através do sistema supervisor Blueplant (Altus), utilizando os protocolos de comunicação industriais OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) e Modbus/TCP.

O Blueplant, representado na figura 45 é uma solução avançada para a supervisão industrial, atuando como DCS ou SCADA através recursos avançados de controle, comunicação, aquisição de dados e visualização em 3D. O software é capaz de gerenciar um

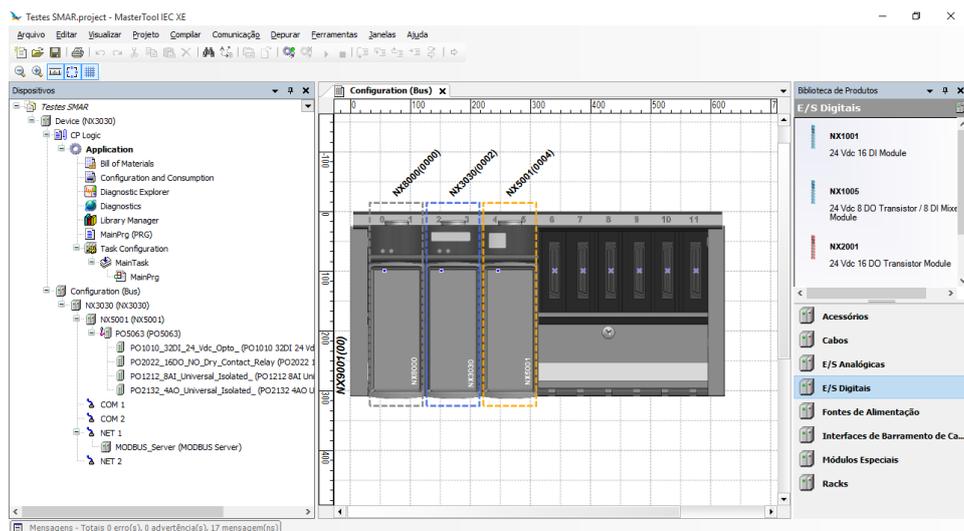


Figura 44: Interface do MasterTool IEC (Altus - Sistemas de Automação S.A.)

grande número de CLPs através dos principais protocolos industriais utilizados no mercado. O Blueplant suporta a integração com os principais bancos de dados relacionais, gerando dados históricos e alarmes de acordo com os parâmetros definidos nas configurações de TAGs (variáveis dinâmicas).



Figura 45: Supervisório Blueplant (Altus - Sistemas de Automação S.A.)

A fim de explorar os recursos de renderização de modelos 3D presentes no Blueplant foi confeccionado um modelo 3D da planta industrial da SMAR (vide figura 47). O modelo foi implementado através do Blender (Blender Foundation), um software open source para a criação de jogos, simulações e modelos tridimensionais. O modelo 3D foi exportado para o formato XAML (eXtensible Application Markup Language) e carregado no Blueplant, através de uma biblioteca personalizada desenvolvida no âmbito do projeto 3DCS.

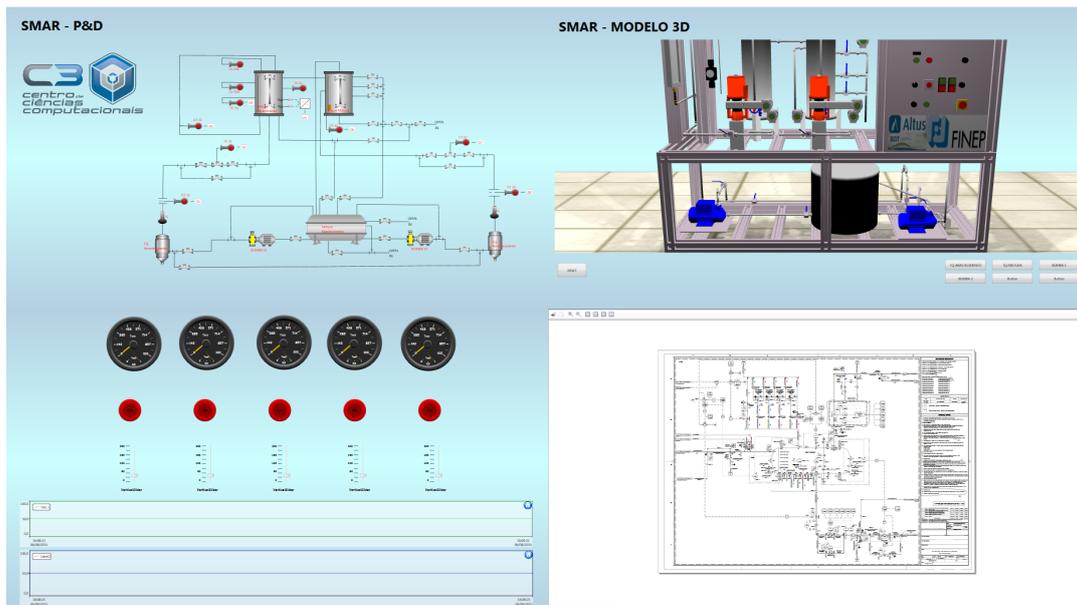


Figura 46: Interface desenvolvida no Blueplant

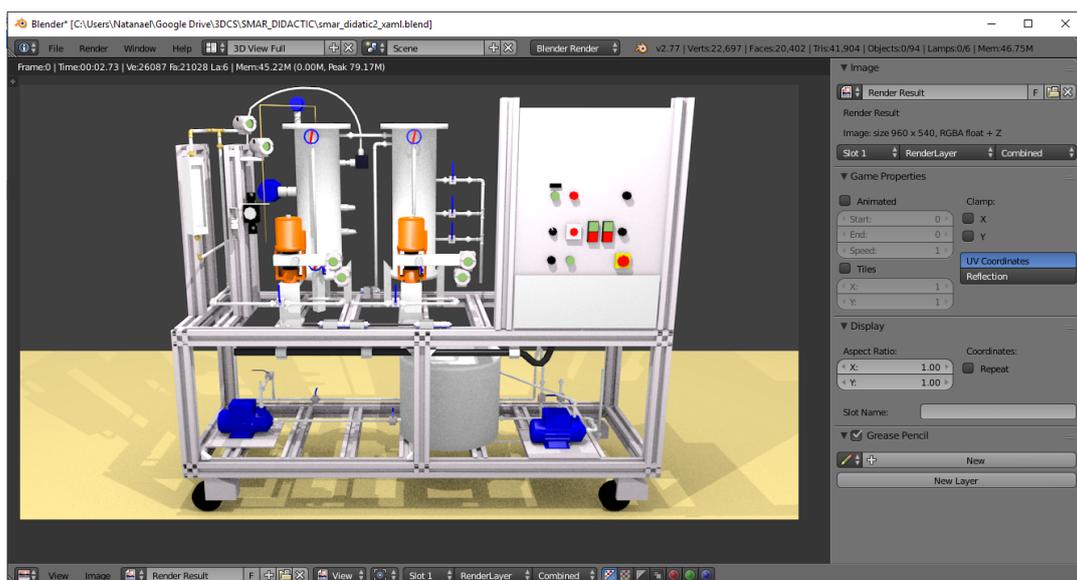


Figura 47: Modelo 3D da Planta Didática no Blender

Também foram desenvolvidos bancos de dados para a aquisição e persistência de dados históricos e alarmes, onde empregou-se os bancos de dados SQL Server e MySQL. Foram criados scripts para a manipulação dessas bases de dados nas interfaces do Blueplant. Através dessas bases de dados, foram criados alguns serviços como a consulta a alarmes e dados históricos, implementados através de webservices visando a integração com o Middleware CPPS.

Por fim, foi desenvolvido um aplicativo para dispositivos móveis com recursos de realidade aumentada, capaz de apresentar informações através de elementos virtuais sobrepostos ao ambiente. O desenvolvimento dessa aplicação foi realizado através da IDE Unity3D, utilizando a biblioteca Vuforia, webservices e MQTT (MQ Telemetry Trans-

port), um protocolo de comunicação para IoT.

A aplicação de realidade aumentada foi realizada utilizando a técnica de projeção com marcadores, utilizando o padrão QRCode. Foram exploradas duas abordagens de aplicação: a exibição de informações oriundas de sistemas e dispositivos sobre o modelo 3D e a exibição de informações dinâmicas sobre componentes virtuais (displays).

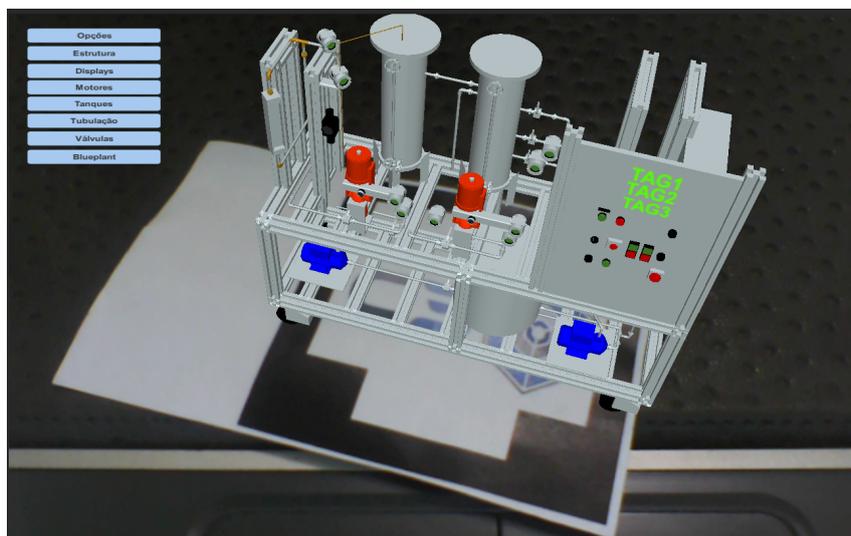


Figura 48: Modelo 3D da planta industrial apresentado com realidade aumentada



Figura 49: Displays virtuais apresentando informações no ambiente físico

A próxima etapa de desenvolvimento compreendeu a implementação do Middleware CPSS e será descrito na próxima seção.

5.1.2 Implementação e Configuração do Middleware

A implementação dos módulos do Middleware CPSS foi realizada através da combinação de diferentes tecnologias como o NodeJS (módulo de comunicação), MySQL (Banco de Dados), PHP (back-end), HTML e CSS (front-end), OWL (módulo de inteli-

gência). As interfaces do Middleware foram implementadas com tecnologias para web, de modo a flexibilizar sua utilização e configuração através de redes TCP/IP.

A primeira etapa de desenvolvimento do Middleware compreendeu a criação de uma base de dados para cobrir as funcionalidades de cada um dos quatro módulos: comunicação, sensibilidade ao contexto, virtualização e inteligência.

O módulo de comunicação foi implementado utilizando o NodeJS (Joyent, 2009), um interpretador de Javascript baseado no interpretador V8 JavaScript Engine (Google) que funciona no lado do servidor e foi projetado para suportar um grande número de conexões e aplicações de alta escalabilidade. Foram implementadas as funcionalidades de comunicação com dispositivos físicos, suportando os protocolos MODBUS (RTU/TCP), OPC UA e MQTT. A comunicação virtual utilizada para estabelecer a conexão com aplicações foi implementada através de clientes REST e SOAP, viabilizando a configuração de repositórios de serviços das aplicações integradas.

A base de dados do gerenciador de dispositivos, representada na figura 50 foi concebida para suportar a configuração de diversos dispositivos através de diferentes protocolos. Uma vez que a comunicação é estabelecida, as variáveis disponibilizadas pelos dispositivos, ou TAGs se tornam acessíveis ao Middleware, onde podem ser configuradas e reutilizadas. Os dispositivos também podem possuir serviços, os quais devem ser configurados e parametrizados nesse módulo.

A comunicação com sistemas é realizada através do gerenciador de comunicação virtual, cuja base de dados está representada na figura 51. Nesse módulo são configurados os parâmetros de comunicação com as diferentes aplicações utilizadas nos níveis de gerenciamento. As aplicações fornecem um conjunto de interfaces baseadas em webservices, onde parte de suas funcionalidades são compartilhadas e podem ser reutilizadas pelo Middleware CPPS.

Na sequência, foram desenvolvidas as interfaces utilizadas para a configuração da comunicação com dispositivos e aplicações (vide figura 52). Nessas interfaces são especificados os drivers de comunicação de acordo com os protocolos de redes industriais (MODBUS RTU/TCP, OPC, MQTT), os parâmetros e serviços dos dispositivos físicos. De forma similar, foram desenvolvidas interfaces de configuração para a comunicação com aplicações através de webservices (SOAP, REST).

Uma vez registradas, as variáveis e serviços disponíveis nos dispositivos e aplicações integrados passam a formar uma base de variáveis dinâmicas (TAGs), que serão utilizadas para realizar a integração do modelo topológico e semântico com o mundo real.

A segunda fase de implementação compreendeu o desenvolvimento do módulo de virtualização. Esse módulo viabiliza a criação do modelo topológico, o modelo que contém a estrutura física da planta com seus componentes, subcomponentes e atributos.

Baseado nas especificações do módulo de virtualização, estabelecidas no capítulo anterior, foram criadas as tabelas para persistir o modelo topológico, viabilizando a mani-

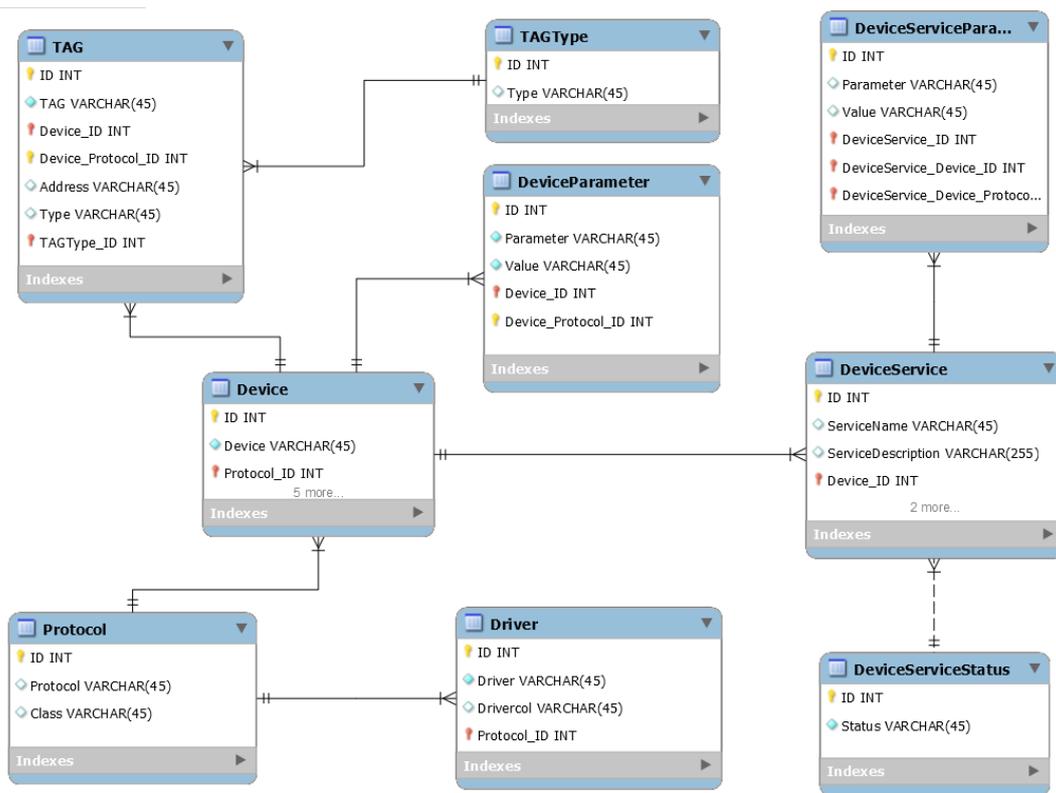


Figura 50: Middleware CPPS - Banco de dados: Comunicação com Dispositivos Físicos)

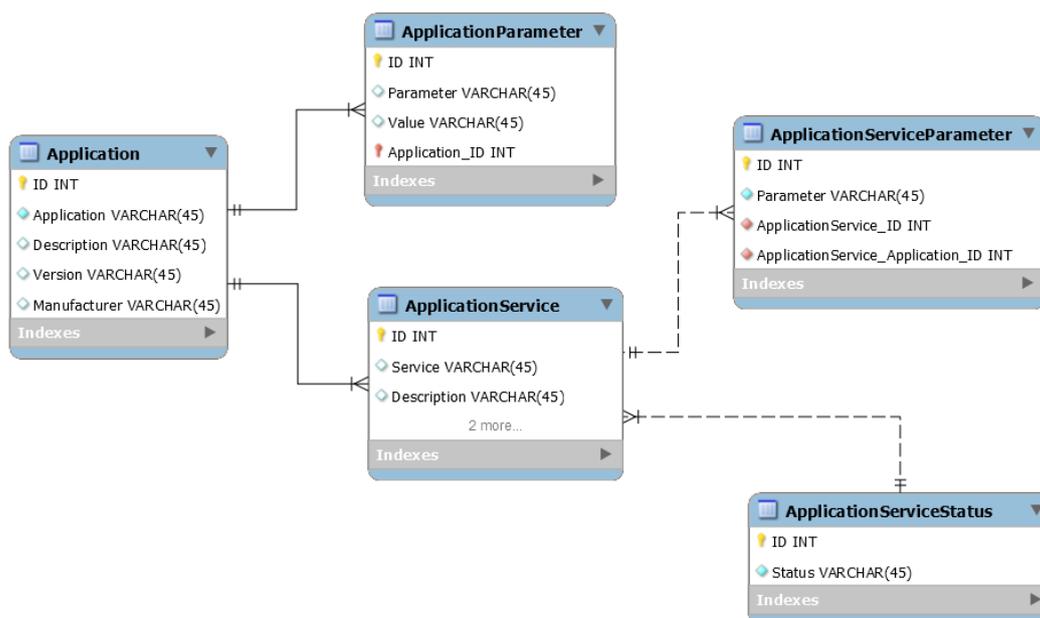


Figura 51: Middleware CPPS - Banco de dados: Comunicação Virtual)

MIDDLEWARE CPPS

Dispositivos

Página << < 1 > >> de 1 Registros 1 para 3 de 3 20

+ Inserir

ID	Device	Protocolo	Host	Port	Status		
1	CLP1 NX3030	MODBUS/TCP	192.168.15.1	502	ONLINE	🔍 🗑️ ✖️	TAGs Services
2	CLP2 NX3030	MODBUS/TCP	192.168.15.2	502	OFFLINE	🔍 🗑️ ✖️	TAGs Services
3	SMARTPLUG	MQTT	192.168.15.50	1883	OFFLINE	🔍 🗑️ ✖️	TAGs Services

©2016 - Natanael Garcia Rodrigues - PPGCOMP - FURG

Figura 52: Middleware CPPS - Módulo de Comunicação: Comunicação com Dispositivos)

MIDDLEWARE CPPS

Aplicações

Página << < 1 > >> de 1 Registros 1 para 2 de 2 20

+ Inserir

ID	Application	Description	Version	Manufacturer		
1	DCS - BLUEPLANT	Supervisory	bp-2012.1.67	Altus	🔍 🗑️ ✖️	Serviços Parâmetros
2	IMS - WATCHDOG	Intelligent Maintenance System		UFRGS	🔍 🗑️ ✖️	Serviços Parâmetros

©2016 - Natanael Garcia Rodrigues - PPGCOMP - FURG

Figura 53: Middleware CPPS - Módulo de Comunicação: Comunicação com Aplicações)

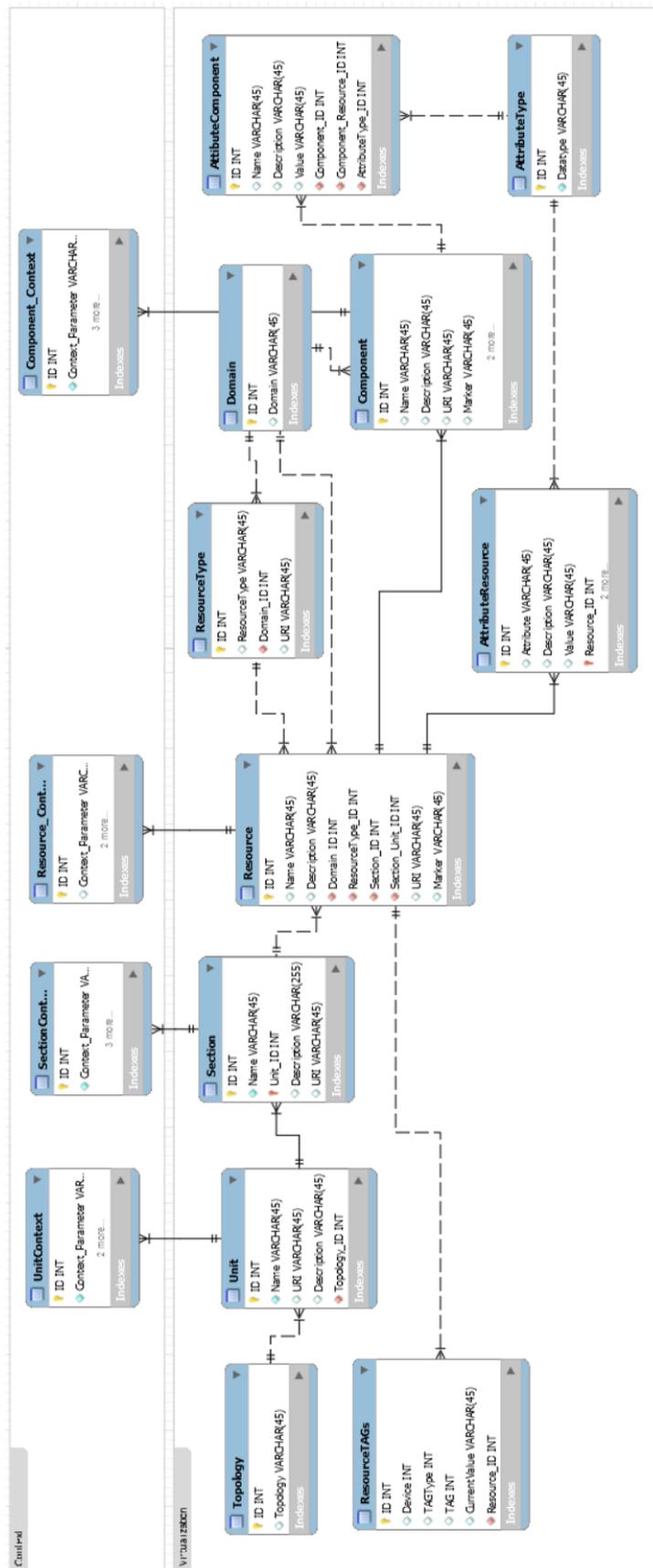


Figura 54: Middleware CPPS - Banco de dados: Virtualização

pulação dos dados das referências dos domínios físico, humano, virtual e de produção.

Foram implementadas as interfaces para a manipulação e especificação do modelo topológico, possibilitando desde a representação de unidades, instalações (como departamentos, setores), os recursos disponíveis nessas instalações (as máquinas, os equipamentos de automação, de comunicação, entre outros) com seus respectivos componentes e propriedades.

O AutomationML foi utilizado como modelo de referência, visando a compatibilização do modelo gerado através do Middleware CPPS. O objetivo da adoção desse padrão é a possibilidade de implementar a importação e exportação de componentes, reaproveitando modelos topológicos.

O modelo topológico gerado através do Middleware recebeu alguns elementos de contexto definidos por padrão, como as unidades e as instalações, situando os componentes da planta dentro das instalações. No entanto, novos atributos relacionados a aquisição de contexto podem ser atribuídos aos recursos através dos atributos.

Também foram implementadas partes da base de dados e interfaces do módulo de inteligência, onde é possível criar os repositórios de ontologias que podem ser associadas aos recursos definidos pelo editor de referências na geração do modelo semântico. Ontologias modeladas através do editor Protégé (Stanford) no formato OWL podem ser vinculadas ao repositório da base de conhecimento.

5.1.3 A Arquitetura Desenvolvida

A arquitetura desenvolvida na implementação desse estudo de caso foi orientada com a proposta do capítulo anterior que descreveu uma arquitetura que prioriza o desenvolvimento de cinco camadas: a camada humana, a camada de interação humana, a camada de aplicação, a camada cibernética e por fim a camada física.

Na camada humana relacionada a esse estudo de caso, tem-se as pessoas que utilizam diretamente o supervísório como os operadores, os supervisores e aqueles que utilizam as informações dele indiretamente, como a equipe de manutenção, a coordenação da produção, entre outros.

Na camada de interação humano-computador (IHC), temos as interfaces do sistema supervísório Blueplant e as interfaces da aplicação baseada em realidade aumentada. A aplicação de realidade aumentada é compatível com dispositivos móveis como tablets e smartphones e óculos inteligentes, habilitando a apresentação de informações in loco.

Na camada de aplicação tem-se o supervísório Blueplant, que monitora e controla os processos da planta, gerando alarmes e dados históricos. Através de webservices, o sistema compartilha essas informações com o Middleware CPPS.

Já na camada cibernética, temos o Middleware CPPS, que fornece a estrutura para formar o modelo topológico, semântico e ciberfísico da planta industrial. Através da estrutura de seus módulos, o middleware estabelece as bases para a integração de dis-

positivos e sistemas dos diferentes níveis gerenciais. Por fim, tem-se a camada física, que nesse caso é formada pela planta industrial, sua estrutura física com os componentes físicos (sensores, atuadores, controladores, etc).



Figura 55: Arquitetura de Integração Vertical - Camadas

5.1.4 Análise

Nesse estudo de caso, demonstra-se a aplicação do CPPS como integrador vertical, habilitando a interação entre os elementos dos diferentes níveis gerenciais. Dispositivos e sistemas são visualizados e manipulados em interfaces multimodais baseadas em realidade aumentada.

O Middleware CPPS viabiliza a integração de dispositivos e sistemas habilitando a integração das informações provenientes desses recursos com o modelo topológico e semântico. O resultado dessa combinação é uma parte significativa do modelo ciberfísico.

Pode-se ressaltar a importância do modelo topológico como instrumento de descrição dos recursos disponíveis, exibindo as propriedades, os componentes, as interfaces e seus relacionamentos. Esse modelo também viabiliza a criação de referências para o modelo semântico, através das quais podem ser referenciados elementos definidos através de ontologias.

O desenvolvimento do modelo semântico não foi plenamente explorado nesse estudo

de caso, mas foram especificadas as bases para o desenvolvimento desse modelo através da propriedade URI (Unique Resource Identifier) presente na especificação de todos os elementos do modelo topológico.

Entre as vantagens da aplicação desse tipo de sistema pode-se enumerar: a visibilidade, a rastreabilidade, a transparência e o reaproveitamento de serviços. O CPPS amplia a visibilidade sobre as operações realizadas, deixando transparente a origem dos dados e os elementos associados a estes.

A rastreabilidade advém do fato de que todos os componentes são conhecidos pelo sistema, assim como os seus parâmetros de funcionamento, facilitando a identificação de problemas. O CPPS integra os serviços disponíveis em todos os recursos, criando um grande repositório que pode ser reaproveitado com mais facilidade.

As interfaces desenvolvidas com realidade aumentada, apresentando informações adquiridas dos sistemas e integrados pelo middleware, constitui-se em um importante instrumento para a atuação humana, habilitando a apresentação e o uso dessas informações diretamente no ambiente. Quanto mais sistemas e dispositivos forem integrados ao middleware, maior será a quantidade de dados disponíveis para apresentação através desse tipo de interface.

A disponibilidade de informação útil, agregada através do CPPS e apresentada in loco por meio de interfaces com realidade aumentada reduz o tempo necessário para a realização das atividades pertinentes a coordenação, supervisão, operação e manutenção da planta, contribuindo dessa forma para a redução de custos operacionais.

5.2 Estudo de Caso 2 - Integração Horizontal

Nesse estudo de caso, aborda-se a aplicação do CPPS e do IMS como instrumentos de integração horizontal na cadeia de suprimentos de peças de reposição.

5.2.1 O Cenário e Tecnologias

Este estudo de caso foi desenvolvido no âmbito do projeto I2MS2C (Integrating Intelligent Maintenance Systems and Spare Parts Supply Chains) no programa BRAGECRIM (Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura) da CAPES. O projeto foi dividido de acordo com a perspectiva tecnológica em algumas áreas temáticas descritas na figura 56 com o objetivo de investigar a cadeia de suprimentos através do emprego de sistemas de manutenção inteligente.

A integração horizontal, abordada nos capítulos anteriores trata da integração da organização industrial enquanto empresa e o seu relacionamento com os parceiros de negócios da cadeia produtiva e de suprimentos. Na Indústria 4.0, a integração horizontal se refere a otimização dos processos que envolvem a troca de materiais e informações nos diferentes estágios da manufatura e logística (KAGERMANN, 2014).

A cadeia produtiva é formada por várias empresas que cooperam para o desenvolvimento de um produto, colaborando para o desdobramento dos estágios da manufatura. Já a cadeia de suprimentos visa a manutenção da atividade produtiva, fornecendo os recursos necessários para a realização de rotinas de manutenção dos equipamentos da produção. A falta de peças de reposição e a conseqüente ineficiência da manutenção acarretam na baixa disponibilidade de equipamentos, prejudicando o nível de serviços e aumentando os custos de produção no setor industrial (ISRAEL, 2014).

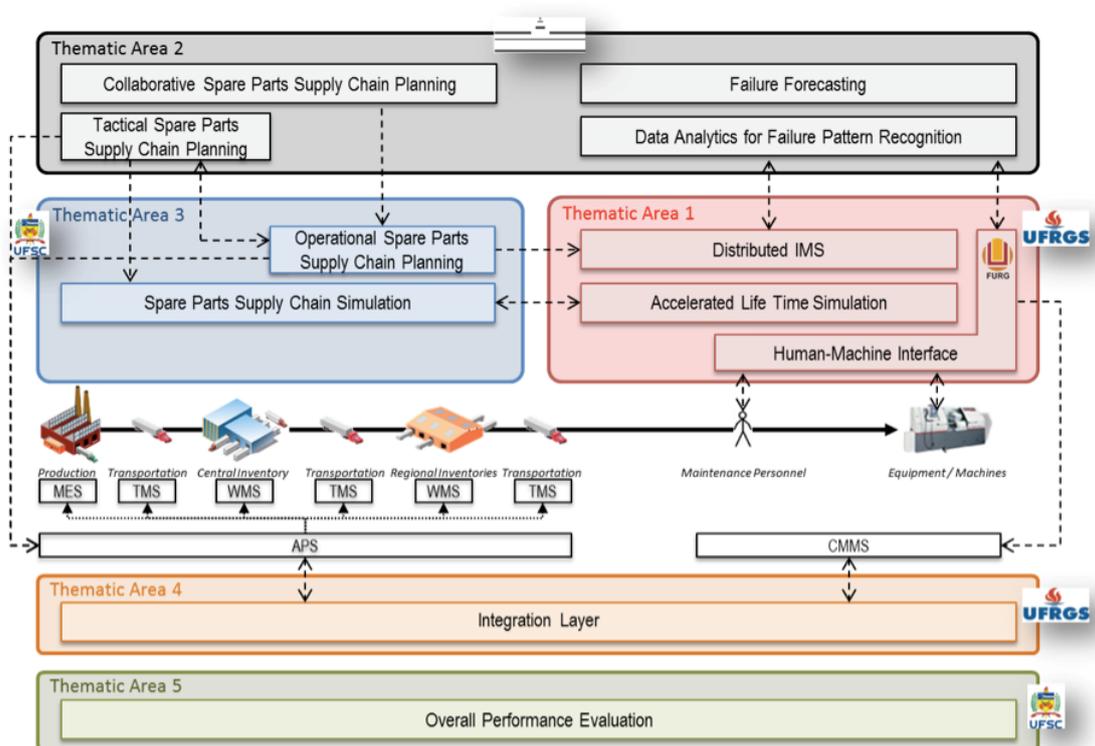


Figura 56: Áreas temáticas do projeto I2MS2C

Recentemente, com o desenvolvimento da manutenção preditiva surgiram os sistemas IMS (Intelligent Maintenance Systems) que utilizam redes de sensores para identificar padrões de falhas. O IMS aponta a ocorrência de falhas com grande precisão, viabilizando a melhoria dos processos logísticos e a execução da manutenção programada. Esses sistemas utilizam algoritmos avançados, aplicados através de técnicas de processamento de sinais para identificar padrões de falhas através do monitoramento contínuo dos equipamentos.

Os sistemas inteligentes de manutenção são baseados no paradigma de Manutenção Baseada em Condição (Condition-Based Maintenance - CBM). Através dos dados adquiridos por sensores, o IMS analisa a saúde dos equipamentos, monitorando a degradação dos componentes da máquina. Através dessa análise é possível prever de falhas ou quebras, identificando a demanda de peças de reposição.

O IMS é um sistema que atua no terceiro nível de gerenciamento, fornecendo da-

dos que complementam as informações dos sistemas CMMS (Computerized Maintenance Management System), os sistemas computadorizados de manutenção. No CMMS são registrados todas as informações referentes aos processos de execução e programação da manutenção.

O IMS utilizado nesse estudo de caso foi o WatchDog, com códigos implementados em Matlab (software de modelagem e programação matemática). O WatchDog possui um Dataset com as assinaturas de falhas previamente identificadas e catalogadas que servem como base para a identificação desses padrões nos equipamentos monitorados.

A manutenção preditiva otimiza a saúde dos equipamentos para a maior performance dos processos produtivos. O OSA-CBM define seis blocos funcionais que caracterizam a manutenção baseada em condição:

- Aquisição de Dados (Data Acquisition): converte uma saída de um transdutor para um parâmetro digital, representando a quantidade física e a informação relacionada (com o tempo, calibração, qualidade dos dados, coletor de dados utilizado e configuração dos sensores).
- Manipulação de Dados (Data Manipulation): realiza a análise de sinais, computando descritores e derivando leituras se sensores virtuais, originando dados de medidas reais.
- Detecção de Estado (State Detection): habilitam a criação de manutenção de uma linha de base de perfis e a busca por anomalias quando novos dados são adquiridos, determinando uma zona de anomalias que pode ser utilizada para criar alertas ou alarmes.
- Avaliação de Saúde (Health Assessment): avalia e diagnostica as falhas e as taxas de saúde atual do equipamento ou processo, considerando-se todas as informações de estados.
- Avaliação Prognóstica (Prognostics Assessment): determina futuros estados de saúde e modos de falhas com base na avaliação atual da saúde e cargas de utilização prevista para o equipamento e /ou processo, assim como a vida útil remanescente.
- Geração de Parecer (Advisory Generation): fornece informações úteis sobre a manutenção ou alterações operacionais necessárias para otimizar a vida útil do equipamento ou processo.

A integração do IMS com o Middleware CPPS foi implementada através de webserviços nos padrões REST e SOAP. Foram implementados os serviços de aquisição de saúde dos equipamentos monitorados e a previsão da demanda de suprimentos.

5.2.2 A Arquitetura Desenvolvida

A arquitetura utilizada para a implementação desse estudo está representada na figura 57 e contém duas perspectivas de integração: uma integração vertical entre o IMS e o Middleware CPPS e a integração horizontal executada pelo Middleware CPPS.

O IMS foi devidamente configurado e aplicado no monitoramento do desgaste dos componentes da planta. Na sequência os dados são analisados e processados pelos módulos do WatchDog, que fornece através do webservice as informações da demanda de peças de reposição e a saúde dos componentes monitorados.



Figura 57: Estudo de Caso 2 - Arquitetura para integração da Cadeia de Suprimentos de Peças de Reposição

No middleware, dentro da camada de comunicação, o agente de comunicação virtual viabiliza a configuração dos serviços disponibilizados pelo IMS, habilitando a utilização dos dados por todos os demais sistemas integrados. O status e saúde dos equipamentos podem ser registrados no modelo topológico e ciberfísico.

Baseado na informação da demanda de peças e serviços detectados pelo IMS, o middleware pode ser configurado para disparar as solicitação de orçamentos para a aquisição dessas peças junto aos fornecedores da cadeia de suprimentos, utilizando dados de outros sistemas integrados, como o ERP e SCM.

Em seguida, o middleware recebe as propostas dos fornecedores e seleciona as ofertas de acordo com os critérios de tempo, custo e capacidade de fornecimento. Essas informações podem ser disponibilizadas para a equipe de compras que seleciona e conclui a aquisição das peças.

Os fornecedores selecionados, por sua vez, podem programar a aquisição e transporte das peças adquiridas com mais eficiência e prazos de entrega compatíveis com a realização da manutenção programada. Dessa forma, todos os agentes envolvidos nessas operações que ocorrem na cadeia de suprimentos podem se antecipar e se beneficiar da

previsão da demanda adquirida através do IMS e compartilhada através do middleware CPPS.

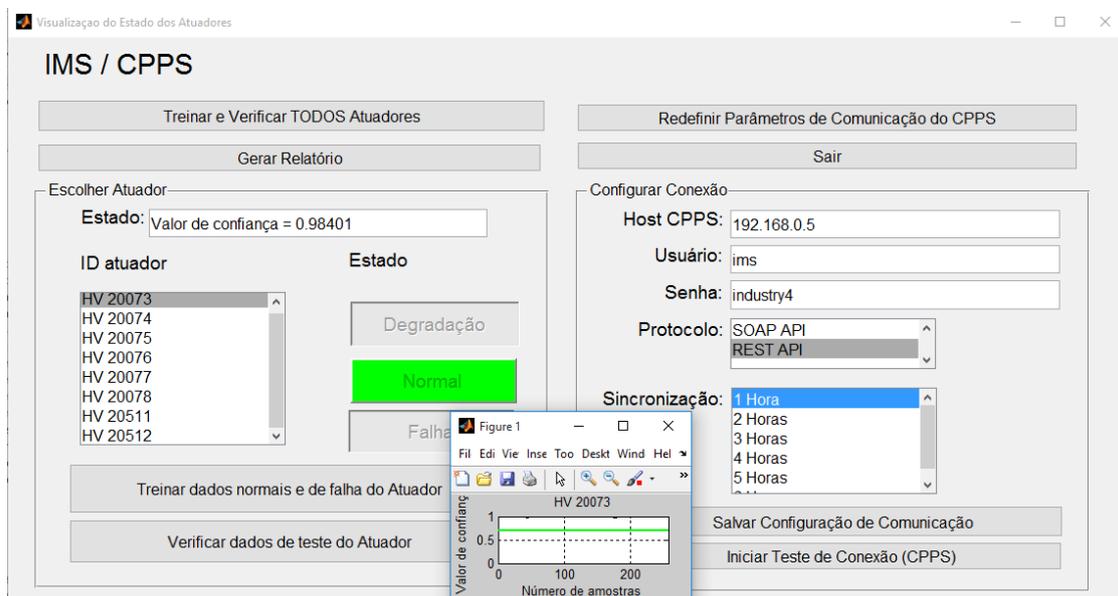


Figura 58: Interface de Configuração do IMS

5.2.3 Análise

A integração vertical do IMS com o Middleware CPPS não só viabiliza uma série de aplicações relacionadas à melhoria dos processos de manutenção, como habilita aplicações de integração horizontal, através do compartilhamento da informação da demanda de peças de reposição com os agentes da cadeia de suprimentos.

A previsão da demanda de peças de reposição é crucial para a otimização da cadeia de suprimentos, uma vez que a manutenção dos estoques de peças de reposição representa custos elevados. A antecipação da demanda afeta a programação das operações realizadas pelos demais agentes da cadeia (fabricantes de peças, centros de distribuição e serviços, distribuidores, revendedores e transportadoras).

A integração do IMS com o middleware CPPS também pode beneficiar as equipes de manutenção, direcionando a execução dos processos de manutenção programada. A manutenção programada não representa custos elevados, e mantém a alta disponibilidade dos equipamentos de produção.

Da mesma forma, os dados adquiridos pelo IMS também podem contribuir para a realização de simulações, fornecendo modelos de referência para a configuração adequada dos equipamentos.

5.3 Considerações Finais

Nesse capítulo foram apresentados dois estudos de caso que abordam a aplicação dos sistemas ciberfísicos de produção como mecanismo de integração vertical e horizontal. Diversas tecnologias foram exploradas na construção de um modelo que pode contribuir para o desenvolvimento de fábricas mais inteligentes.

No próximo capítulo são realizadas discussões em torno do trabalho e apresentadas propostas de trabalhos futuros.

6 DISCUSSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesse trabalho foi proposto uma arquitetura e middleware para o desenvolvimento de um sistema ciberfísico de produção (CPPS). Esse sistema visa a integração dos níveis de gerenciamento industrial, permitindo a realização das operações internas (produção, supervisão) e externas (referentes à cadeia de suprimentos), através de tecnologias que promovam a interação entre processos físicos, equipamentos, pessoas e sistemas.

Os sistemas ciberfísicos são vistos como peças fundamentais para a concepção de fábricas inteligentes, ou seja, fábricas que gerenciam seus recursos de forma otimizada, sustentável e eficiente, baseada na aplicação de elementos tecnológicos com alto nível de automação de processos.

Esse trabalho, procurou apresentar uma breve contextualização em torno do tema, retratando a evolução do cenário industrial, a organização e os níveis de gerenciamento. Em seguida, abordou a integração de sistemas na manufatura, identificando algumas das abordagens, arquiteturas e tecnologias utilizadas nesse sentido.

No capítulo 2, foram apresentados os conceitos associados à sistemas ciberfísicos, os quais promovem a integração entre a computação e os processos físicos, através de tecnologias de comunicação, controle e computação. O trabalho também abordou no capítulo 3 a aplicação do CPS no contexto da Industria 4.0.

Foram analisados os trabalhos relacionados, com diferentes abordagens, perspectivas e tecnologias empregados no mesmo sentido: promover a integração do ambiente de manufatura. Alguns desses trabalhos, apresentaram em seu escopo descrições de arquiteturas para sistemas ciberfísicos. Essas arquiteturas foram analisadas, servindo como base teórica para a elaboração da proposta.

No capítulo 4 foi proposta uma arquitetura para o desenvolvimento de um sistema ciberfísico de produção, através do qual, os níveis de gerenciamento industrial podem ser integrados, melhorando a interação humano-máquina e a gestão dos recursos da planta.

A arquitetura foi estruturada em cinco camadas: camada humana, de interfaces humano-computador, de aplicação, cibernética e física. O foco do trabalho foi direcionado para a camada cibernética, que é a camada que diferencia os sistemas ciberfísicos do atual estado da arte dos sistemas de automação e gerenciamento industrial.

A proposta desenvolvida para a camada cibernética, envolve um método para a concepção do modelo ciberfísico, ou modelo virtual da fábrica, assim como a construção de um sistema mediador (middleware), capaz de relacionar os elementos do mundo real com o modelo virtual.

Também foram descritos alguns dos componentes necessários para o desenvolvimento do sistema integrador (middleware), que apresenta uma arquitetura modular e diversos componentes. Esses módulos e componentes do middleware atuam na implementação de conceitos importantes para a concepção do sistema ciberfísico de produção, como a comunicação, virtualização, inteligência e sensibilidade ao contexto.

O CPPS proposto buscou promover a integração e a colaboração entre os recursos disponíveis na planta, orquestrando a realização das operações da produção. Dessa forma, foram descritas algumas estratégias para a integração dos sistemas e dispositivos utilizados nos diferentes níveis de gestão do ambiente industrial.

O capítulo 5 apresentou a aplicação do modelo proposto em dois estudos de casos reais, no âmbito de dois projetos de pesquisa. O modelo CPPS proposto no capítulo 4 teve suas camadas efetivamente implementadas no Middleware, de modo a promover a efetiva integração horizontal e vertical em cenários industriais. Tecnologias de interação, acesso, tratamento e tomada de decisão foram estudadas e utilizadas no middleware proposto.

O middleware CPPS desenvolvido foi aplicado na integração vertical de diferentes elementos presentes em uma planta industrial no projeto FINEP 3DCS em parceria com a empresa Altus SA. Este estudo envolveu a integração de diferentes sensores e atuadores, o sistema SCADA, banco de dados, interfaces multimodais com realidade aumentada e a realização de atividades de supervisão, manutenção e operação.

O segundo estudo foi realizado junto ao projeto I2MS2C no programa BRAGECRIM. O estudo envolveu a integração de sistemas inteligentes de manutenção com o middleware CPPS. O IMS monitora a saúde dos equipamentos e fornece uma previsão de demanda de peças de reposição. Na sequência o middleware utilizou essa informação para otimizar as operações logísticas, antecipando a aquisição e o planejamento da manutenção.

O trabalho não cobre todos os aspectos pertinentes ao tema, dada a natureza multidisciplinar que reside na concepção desse tipo de aplicação. Contudo, busca a promoção de uma visão geral, e baseado nos trabalhos analisados, reúne os elementos que podem colaborar para o desenvolvimento do CPPS.

Atualmente, o trabalho de pesquisa relacionado a aplicações CPS na manufatura tem ganhado muita expressão, tendo em vista os grandes benefícios que a gestão efetiva dos recursos de produção representam.

O cenário projetado para o futuro da indústria é muito promissor, e assim como ocorreu nas revoluções anteriores, carrega uma grande onda de transformações de grande impacto na economia e sociedade.

6.1 Trabalhos Futuros

A arquitetura proposta trata vários aspectos que podem ser desenvolvidos em trabalhos futuros. O foco desse trabalho foi direcionado mais especificamente para a camada ciberfísica, no entanto, todas as demais camadas podem ser objeto de pesquisa e implementações.

Do ponto de vista tecnológico, a camada de interface humano-computador pode explorar aplicações baseadas em interfaces multimodais para interação homem máquina e para a aquisição de conhecimento especialista humano sobre o processo. A interação humana é um dos pontos cruciais para o desenvolvimento do CPPS, uma vez que ele é tido como o recurso integrador e essencial para o sistema.

A camada de aplicação atua também no sentido de promover a integração de sistemas visando o reaproveitamento de funcionalidades para a cooperação entre os elementos do CPPS. O paradigma de orientação a serviços é recente, e contribui significativamente nesse mesmo sentido, possibilitando que as aplicações passem a interagir compartilhando informações e funcionalidades.

Ainda na camada de aplicação, podem ser implementados estudos de casos baseados na integração de sistemas utilizados no gerenciamento industrial, como os sistemas ERP, CMMS, MES, SCADA, etc.

A camada cibernética possui diversos aspectos a serem aprofundados, como a questão do sincronismo temporal, a representação, o controle de processos, a integração de documentos (como modelos tridimensionais, manuais, modelos matemáticos, máquinas de estados, entre outros) etc. A implementação do middleware CPPS em uma linguagem computacional e o desenvolvimento de interfaces para a realização do processo de modelagem CPPS também são atividades relevantes para complementar essa pesquisa.

Trabalhos no sentido de desenvolver as ontologias dos domínios relacionados (domínio físico, humano, produção e virtual) também devem ser discutidos futuramente. Essas ontologias são importantes para a construção do modelo semântico, refletindo significativamente a melhoria do modelo ciberfísico.

Estudos visando a integração de outras ontologias, de domínios relacionados, como a manutenção, a cadeia de suprimentos, processos produtivos, controle de qualidade, etc também são questões a serem investigadas.

De modo geral, entre os elementos relacionadas que podem ser explorados com maior profundidade, ou em implementações podemos destacar:

- Integração de Aplicações
- Aquisição do Contexto
- Interfaces Avançadas (Realidade Virtual e Aumentada)
- Interfaces para Dispositivos Móveis

- Mineração de Dados e Big Data
- Protocolos de Redes Industriais e IoT
- Segurança Ciberfísica
- Ontologias
- Representação Virtual
- Integração Semântica de Dados
- Algoritmos (para detecção de eventos, processamento de sinais, reconhecimento de padrões de falhas, geração de dados históricos, etc).

REFERÊNCIAS

AHN, S. H.; SUNDARARAJAN, V.; SMITH, C.; KANNAN, B.; D'SOUZA, R.; SUN, G.; MOHOLE, A.; WRIGHT, P. K.; KIM, J.; MCMAINS, S. et al. CyberCut: an internet-based cad/cam system. **Journal of Computing and Information Science in Engineering**, [S.l.], v.1, n.1, p.52–59, 2001.

ALLEN, R. C. **The British industrial revolution in global perspective**. [S.l.]: Cambridge University Press Cambridge, 2009.

ALMEIDA, M. B.; BAX, M. P. Taxonomia para projetos de integração de fontes de dados baseados em ontologias. , [S.l.], 2012.

BANGEMANN, T.; KARNOUSKOS, S.; CAMP, R.; CARLSSON, O.; RIEDL, M.; MCLEOD, S.; HARRISON, R.; COLOMBO, A. W.; STLUKA, P. State of the art in industrial automation. In: **Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems**. [S.l.]: Springer, 2014. p.23–47.

BANZATO, E. **Tecnologia da informação aplicada à logística**. [S.l.]: INSTITUTO IMAM, 2005.

BIFFL, S.; SCHATTEN, A.; ZOITL, A. Integration of heterogeneous engineering environments for the automation systems lifecycle. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL INFORMATICS, 2009., 2009. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2009. p.576–581.

BIFFL, S.; SCHATTEN, A.; ZOITL, A. Integration of heterogeneous engineering environments for the automation systems lifecycle. In: INDUSTRIAL INFORMATICS, 2009. INDIN 2009. 7TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2009. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2009. p.576–581.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER, M. B.; BOWERSOX, J. C. **Gestão logística da cadeia de suprimentos**. [S.l.]: Grupo A Educação, 2013.

BUSCHER, M.; KUBE, M.; LEHNHOFF, S.; PIECH, K.; ROHJANS, S.; TREFKE, J. Towards a process for integrated IEC 61850 and OPC UA communication: using the

example of smart grid protection equipment. In: INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, IECON 2014-40TH ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE, 2014. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2014. p.3605–3611.

CALHAU, R. F. **Uma abordagem baseada em ontologias para integração semântica de sistemas**. 2011. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — Master thesis, Universidade Federal do Espírito Santo-UFES.

CHANDRAKASAN, A. P.; BRODERSEN, R. W. **Low power digital CMOS design**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.

COLOMBO, A. W.; KARNOUSKOS, S. Towards the factory of the future: a service-oriented cross-layer infrastructure. **ICT Shaping the World: A Scientific View. European Telecommunications Standards Institute (ETSI), John Wiley and Sons**, [S.l.], v.65, p.81, 2009.

CPS PWG, C.-P. S. P. W. G. Framework for Cyber-Physical Systems. , [S.l.], 2015.

DA XU, L.; HE, W.; LI, S. Internet of Things in industries: a survey. **Industrial Informatics, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.10, n.4, p.2233–2243, 2014.

DANEELS, a.; SALTER, W. What Is Scada ? **Access**, [S.l.], p.339–343, 1999.

DJURDJANOVIC, D.; LEE, J.; NI, J. Watchdog Agent—an infotonics-based prognostics approach for product performance degradation assessment and prediction. **Advanced Engineering Informatics**, [S.l.], v.17, n.3, p.109–125, 2003.

DRATH, R.; HORCH, A. Industrie 4 - Hit or Hype. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, [S.l.], v.8, n.2, p.56–58, jun 2014.

DWORSCHAK, B.; ZAISER, H. Competences for Cyber-physical Systems in Manufacturing -First Findings and Scenarios. **Procedia CIRP**, [S.l.], v.25, p.345–350, 2014.

ESPÍNDOLA, D. B.; FUMAGALLI, L.; GARETTI, M.; PEREIRA, C. E.; BOTELHO, S. S.; HENRIQUES, R. V. A model-based approach for data integration to improve maintenance management by mixed reality. **Computers in Industry**, [S.l.], v.64, n.4, p.376–391, 2013.

ESPINDOLA, D.; FRAZZON, E. M.; HELLINGRATH, B.; PEREIRA, C. E. Integrating intelligent maintenance systems and spare parts supply chains. In: INFORMATION CONTROL PROBLEMS IN MANUFACTURING, 2012. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2012. v.14, n.1, p.1017–1022.

ESPÍNDOLA, D.; FUMAGALLI, L.; GARETTI, M.; BOTELHO, S.; PEREIRA, C. An adaption of OSA-CBM architecture for Human-Computer interaction through mixed interface. In: 2011. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011. p.485–490.

EVANS, P. C.; ANNUNZIATA, M. Industrial internet: pushing the boundaries of minds and machines. **General Electric**, [S.l.], p.21, 2012.

FALLERA, C.; FELDMÜLLERA, D. Industry 4.0 Learning Factory for regional SMEs. **Procedia CIRP**, [S.l.], v.32, p.88–91, 2015.

FELL, M. Roadmap for The Emerging Internet of Things. , [S.l.], 2014.

FIELDING, R. T. **Architectural styles and the design of network-based software architectures**. 2000. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — University of California, Irvine.

GORECKY, D.; SCHMITT, M. Human-Machine-Interaction in the Industry 4 Era. , [S.l.], p.289–294, 2014.

GROOVER JR, M. P. **Automation, Production Systems and Computer-Aided Manufacturing**. [S.l.]: Prentice Hall PTR, 1980.

GROOVER, M. P. "Fundamentals of Modern Manufacturing: materials, processes and systems". [S.l.: s.n.], 2010. 1025p.

GRUBER, T. **What is an Ontology**. 1993.

GÖLZER, P.; CATO, P.; AMBERG, M. Data Processing Requirements of Industry 4.0 - Use cases for big data applications. **Twenty-Third European Conference on Information Systems - ECIS**, [S.l.], 2015.

HELLINGRATH, B.; PEREIRA, C. E.; ESPÍNDOLA, D.; FRAZZON, E. M.; CORDES, A.-K.; SAALMANN, P.; ZUCCOLOTTO, M. On the Integration of Intelligent Maintenance and Spare Parts Supply Chain Management. **IFAC-PapersOnLine**, [S.l.], v.48, n.3, p.983–988, 2015.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios - A Literature Review. **Manufacturing Letters**, [S.l.], 2015.

HOBDAV, M.; DAVIES, A.; PRENCIPE, A. Systems integration: a core capability of the modern corporation. **Industrial and corporate change**, [S.l.], v.14, n.6, p.1109–1143, 2005.

HU, L.; XIE, N.; KUANG, Z.; ZHAO, K. Review of cyber-physical system architecture. In: OBJECT/COMPONENT/SERVICE-ORIENTED REAL-TIME DISTRIBUTED

COMPUTING WORKSHOPS (ISORCW), 2012 15TH IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON, 2012. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2012. p.25–30.

INFOSYS. **Industrie 4.0 – The State of Nations**. 2015.

ISAKSON, A.; DRATH, R. **Cyber-Physical Production Systems - The next industrial revolution?** 2013.

ISRAEL, E. F. **Planejamento Integrado da Cadeia de Suprimentos da Indústria do Petróleo Baseada em Agentes Holônicos**. 2014. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

JAZDI, N. Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. In: AUTOMATION, QUALITY AND TESTING, ROBOTICS, 2014 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2014. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2014. p.1–4.

JOSUTTIS, N. M. **SOA in practice: the art of distributed system design**. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2007.

JOVANE, F.; YOSHIKAWA, H.; ALTING, L.; BOËR, C.; WESTKAMPER, E.; WILLIAMS, D.; TSENG, M.; SELIGER, G.; PACI, A. The incoming global technological and industrial revolution towards competitive sustainable manufacturing. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, [S.l.], v.57, n.2, p.641–659, 2008.

JUNG, M.; WEIDINGER, J.; KASTNER, W.; OLIVIERI, A. "Building Automation and Smart Cities: an integration approach based on a service-oriented architecture". **2013 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops**, [S.l.], p.1361–1367, 2013.

JUNIOR, C. C. **Sistemas Integrados de Gestão - ERP - Uma abordagem Gerencial**. 3ª Edição.ed. Curitiba: Atual, Editora, 2008. 197p.

JURIC, M. B. **SOA Approach to Integration: xml, web services, esb, and bpel in real-world soa projects**. [S.l.]: Packt Publishing Ltd, 2007.

KAGERMANN, H. **Industrie 4.0 – What can the UK learn from Germany 's manufacturing strategy ?** 2014. 0–26p. n.February.

KAGERMANN, H.; HELBIG, J.; HELLINGER, A.; WAHLSTER, W. **Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: securing the future of german manufacturing industry; final report of the industrie 4.0 working group**. [S.l.]: Forschungsunion, 2013.

KAO, H.-A.; JIN, W.; SIEGEL, D.; LEE, J. A Cyber Physical Interface for Automation Systems—Methodology and Examples. **Machines**, [S.l.], v.3, n.2, p.93–106, 2015.

KARNOUSKOS, S.; COLOMBO, A. W. Architecting the next generation of service-based SCADA / DCS system of systems. **Applied Sciences**, [S.l.], p.312–317, 2011.

KARNOUSKOS, S.; COLOMBO, A. W.; BANGEMANN, T.; MANNINEN, K.; CAMP, R.; TILLY, M.; STLUKA, P.; JAMMES, F.; DELSING, J.; ELIASSON, J. A SOA-based architecture for empowering future collaborative cloud-based industrial automation. In: IECON 2012-38TH ANNUAL CONFERENCE ON IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 2012. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2012. p.5766–5772.

KIM, K.-D.; KUMAR, P. R. Cyber–physical systems: a perspective at the centennial. **Proceedings of the IEEE**, [S.l.], v.100, n.Special Centennial Issue, p.1287–1308, 2012.

KIRKHAM, T.; HARRISON, R.; MONFARED, R. P.; PHAITHOONBUATHONG, P.; SAVIO, D.; SMIT, H. "Soa middleware and automation: services, applications and architectures". **IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)**, [S.l.], p.1419–1424, 2008.

KUMAR, P. R. **The Challenges of Cyber-Physical Systems**. 2014.

LAI, F.; ZHANG, M.; LEE, D.; ZHAO, X. The impact of supply chain integration on mass customization capability: an extended resource-based view. **Engineering Management, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.59, n.3, p.443–456, 2012.

LEE, E. A. "Cyber Physical Systems: design challenges". **2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)**, [S.l.], 2008.

LEE, E. A.; SESHIA, S. A. **Introduction to Embedded Systems - A Cyber-Physical Systems Approach**. [S.l.]: LeeSeshia.org, 2014.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H.-A. Recent advances and trends of cyber-physical systems and big data analytics in industrial informatics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL INFORMATICS (INDIN), 2014. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2014.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H.-A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, [S.l.], v.3, p.18–23, 2015.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A.; LAPIRA, E. TRY 4.0. **Manufacturing Leadership**, [S.l.], 2015.

LEE, J.; LAPIRA, E.; BAGHERI, B.; KAO, H.-a. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. **Manufacturing Letters**, [S.l.], v.1, n.1, p.38–41, 2013.

LI, X.; WANG, Y.; ZHOU, X. An event-based architecture for cyber physical systems. In: INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY (ICIST), 2014 4TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2014. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2014. p.96–99.

MARTINS, V. M. M. Integração de Sistemas de Informação: perspectivas, normas e abordagens. , [S.l.], 2006.

MONOSTORI, L. "Cyber-physical production systems: roots, expectations and r&d challenges". **Procedia CIRP**, [S.l.], v.17, p.9–13, 2014.

MOREL, G.; VALCKENAERS, P.; FAURE, J. M. Manufacturing plant control challenges and issues. **Control Engineering Practice**, [S.l.], 2007.

NOVAK, P.; MORDINYI, R. Runtime integration of industrial automation system tools based on engineering service bus. In: INDUSTRIAL TECHNOLOGY (ICIT), 2015 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2015. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2015. p.2976–2981.

NOVAK, P.; SINDELAR, R. Semantic design and integration of simulation models in the industrial automation area. In: EMERGING TECHNOLOGIES & FACTORY AUTOMATION (ETF A), 2012 IEEE 17TH CONFERENCE ON, 2012. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2012. p.1–8.

PETER, S. A Survey on Concepts, Applications, and Challenges in Cyber-Physical Systems. **KSII Transactions on Internet and Information Systems**, [S.l.], v.8, n.12, p.4242–4268, 2014.

PLATTE, C. **Cyber-Physical Systems in Manufacturing and Production - Workshop Report**. [S.l.]: Platte Consult, 2013.

POKRAEV, S. V. Model-driven semantic integration of service-oriented applications. , [S.l.], 2009.

POOVENDRAN, R. Cyber-physical systems: close encounters between two parallel worlds [point of view]. **Proceedings of the IEEE**, [S.l.], v.98, n.8, p.1363–1366, 2010.

PORCELLI, I.; RAPACCINI, M.; ESPÍNDOLA, D. B.; PEREIRA, C. E. Technical and Organizational Issues about the Introduction of Augmented Reality in Maintenance and Technical Assistance Services. In: IFAC WORKSHOP, BRAZIL, MY, 11., 2014. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2014.

POSADA, J.; TORO, C.; BARANDIARAN, I.; OYARZUN, D.; STRICKER, D.; AMICIS, R. de; PINTO, E. B.; EISERT, P.; DOLLNER, J.; VALLARINO, I. Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet. **Computer Graphics and Applications, IEEE**, [S.l.], v.35, n.2, p.26–40, 2015.

RAJKUMAR, R. R.; LEE, I.; SHA, L.; STANKOVIC, J. Cyber-physical systems: the next computing revolution. In: DESIGN AUTOMATION CONFERENCE, 47., 2010. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2010. p.731–736.

SAKAMOTO, M.; YOSHII, A.; NAKAJIMA, T.; IKEUCHI, K.; OTSUKA, T.; OKADA, K.; ISHIZAWA, F.; KOBAYASHI, A. Human Interaction Issues in a Digital-Physical Hybrid World. **2014 IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications**, [S.l.], p.49–54, 2014.

SALOMON, V. A. P.; CONTADOR, J. L.; MARINS, F. A. S.; SANTORO, M. C. Custos potenciais da produção e os benefícios do Planejamento e Controle da Produção. **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, [S.l.], v.22, 2002.

SAUTER, T. Integration aspects in automation-a technology survey. In: EMERGING TECHNOLOGIES AND FACTORY AUTOMATION, 2005. ETFA 2005. 10TH IEEE CONFERENCE ON, 2005. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2005. v.2, p.9–pp.

SCHIRNER, G.; ERDOGMUS, D.; CHOWDHURY, K.; PADIR, T. The future of human-in-the-loop cyber-physical systems. **Computer**, [S.l.], n.1, p.36–45, 2013.

SCHLICK, J.; STEPHAN, P.; LOSKYLL, M.; LAPPE, D. Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung. In: **Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik**. [S.l.]: Springer, 2014. p.57–84.

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

SHVAIKO, P.; EUZENAT, J. Ontology matching: state of the art and future challenges. **Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.25, n.1, p.158–176, 2013.

SMART FACTORY, K. **Keyfinder production line**. 2014.

STAFF, H. Industrial Revolution. , [S.l.], 2009.

STOUFFER, K.; FALCO, J.; KENT, K. Guide to supervisory control and data acquisition (SCADA) and industrial control systems security. **NIST Special Publication SP800-82 (draft)**, [S.l.], p.800—82, 2006.

SWANSON, L. Computerized maintenance management systems: a study of system design and use. **Production and inventory management journal**, [S.l.], v.38, n.2, p.11, 1997.

TAN, Y.; GODDARD, S.; PEREZ, L. C. A prototype architecture for cyber-physical systems. **ACM Sigbed Review**, [S.l.], v.5, n.1, p.26, 2008.

UCKELMANN, D. A definition approach to smart logistics. In: **Next Generation Tele-traffic and Wired/Wireless Advanced Networking**. [S.l.]: Springer, 2008. p.273–284.

URBANSKIENĖ, R.; ŽOSTAUTIENĖ, D.; CHREPTAVIČIENĖ, V. The model of creation of customer relationship management (CRM) system. **Engineering Economics**, [S.l.], v.58, n.3, 2015.

VDE. **The German Standardization Roadmap Industrie 4.0**. [S.l.]: DKE and VDE, 2014.

WAHLSTER, W. The Semantic Product Memory as a Basis for Cyber-Physical Production Systems. , [S.l.], 2013.

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**, [S.l.], v.48, n.3, p.579–584, 2015.

WEYNS, D.; BURES, T. **Software Engineering for Smart Cyber Physical Systems**. 2015. 0–35p. n.September.

WIMMER, M. **Modeling Cyber-Physical Production Systems**. 2012.

WRIGLEY, E. A. **Energy and the English industrial revolution**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2010.

YU, C.; JING, S.; LI, X. An Architecture of Cyber Physical System Based on Service. In: **COMPUTER SCIENCE & SERVICE SYSTEM (CSSS), 2012 INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2012**. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2012. p.1409–1412.

YU, L.; SCHÜLLER, A.; EPPLE, U. On the engineering design for systematic integration of agent-orientation in industrial automation. **ISA transactions**, [S.l.], p.1–6, 2014.

ZUCCOLOTTO, M.; PEREIRA, C. E.; HELLINGRATH, B.; FRAZZON, E. M.; ESPÍNOLA, D.; HENRIQUES, R. V. B. I2MS2C -intelligent maintenance system architecture proposal. **Chemical Engineering Transactions**, [S.l.], v.33, p.241–246, 2013.