

RENATA SAMARA RODRIGUES DE SOUSA

INTEGRAÇÃO CIBERFÍSICA E SEMÂNTICA DA INFORMAÇÃO PARA O
CONTROLE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS

Versão Corrigida

São Paulo
2022

RENATA SAMARA RODRIGUES DE SOUSA

INTEGRAÇÃO CIBERFÍSICA E SEMÂNTICA DA INFORMAÇÃO PARA O
CONTROLE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS

Versão Corrigida

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

Área de Concentração:
Engenharia Química

Orientador:
Prof. Dr. Song Won Park

São Paulo
2022

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

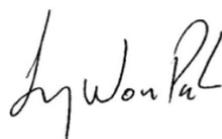
Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 20 de julho de 2022

Assinatura do autor



Assinatura do orientador



Catálogo-na-publicação

Sousa, Renata Samara Rodrigues de
INTEGRAÇÃO CIBERFÍSICA E SEMÂNTICA DA INFORMAÇÃO PARA O
CONTROLE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS / R. S. R. Sousa – versão corr.
São Paulo, 2022.
102 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1. Sistemas Ciberfísicos 2. Controle de Processos 3. Indústria 4.0 4. Transformação Digital 5. Ontologia I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

SOUSA, Renata Samara Rodrigues de. **Integração Ciberfísica e Semântica da Informação para o Controle de Processos Industriais**. 2022. 102p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Química) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química. 2022

Aprovado em: 25/04/2022

Banca Examinadora

Prof. Dr. Song Won Park

Instituição: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Julgamento: Aprovada

Prof. Dr. Antônio Carlos Zanin

Instituição: Petrobras - Externo

Julgamento: Aprovada

Prof. Dr. Flavio Vasconcelos da Silva

Instituição: UNICAMP - Externo

Julgamento Aprovada



Universidade de São Paulo

ATA DE DEFESA

Aluno: 3137 - 11055711 - 1 / Página 1 de 1

Ata de defesa de Dissertação do(a) Senhor(a) Renata Samara Rodrigues de Sousa no Programa: Engenharia Química do(a) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Aos 25 dias do mês de abril de 2022, no(a) realizou-se a Defesa da Dissertação do(a) Senhor(a) Renata Samara Rodrigues de Sousa, apresentada para a obtenção do título de Mestra intitulada:

"Integração ciberfísica e semântica da informação para o controle de processos industriais"

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passa a palavra ao candidato para exposição e a seguir aos examinadores para as devidas arguições que se desenvolvem nos termos regimentais. Em seguida, a Comissão Julgadora proclama o resultado:

Nome dos Participantes da Banca	Função	Sigla da CPG	Resultado
Song Won Park	Presidente	EP - USP	<u>aprovada</u>
Antônio Carlos Zanin	Titular	PETROBRAS - Externo	<u>aprovada</u>
Flavio Vasconcelos da Silva	Titular	UNICAMP - Externo	<u>aprovada</u>

Resultado Final: aprovada

Parecer da Comissão Julgadora *

Eu, Elias Alves de Almeida _____, lavrei a presente ata, que assino juntamente com os(as) Senhores(as) _____, São Paulo, aos 25 dias do mês de abril de 2022.

Antônio Carlos Zanin

Flavio Vasconcelos da Silva

Song Won Park
Presidente da Comissão Julgadora

* Obs: Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório.

A defesa foi homologada pela Comissão de Pós-Graduação em _____ e, portanto, o(a) aluno(a) _____ jus ao título de Mestra em Ciências obtido no Programa Engenharia Química.

Presidente da Comissão de Pós-Graduação

A sessão de defesa ocorreu com todos os participantes de forma não presencial, conectados por meio do aplicativo "Google Meet", com transmissão ao vivo. A sessão virtual foi gravada e está disponível para averiguação. A transmissão ao vivo e a gravação foram interrompidas durante a sessão secreta de julgamento e retomadas para proclamação do resultado. Não foram registrados problemas técnicos durante a sessão.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Song Won Park, pela amizade e parceria ao longo da jornada de aprendizado.

A minha avó, Dona Alsira, minha mãe Jackeline Santana, e primos Ana, Ericka, Maria e Felipe por acreditarem nos meus sonhos junto comigo e pelo grande apoio durante o mestrado. Vocês são grande parte dessa conquista.

A Julio Paez e sua família pelo acolhimento e carinho que encontrei em vocês.

Aos amigos, a família que fiz pelo caminho, por tornarem a jornada mais suave e divertida.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, processo 88887.336319/2019-00.

RESUMO

O conceito de “Transformação Digital” faz referência a potencial quarta revolução industrial e sua emergência ocorreu dentro do projeto Industrie 4.0 através de uma estratégia de desenvolvimento econômico proposta pelo governo alemão no ano de 2011. Desde então, o tema tem sido alvo de discussão em universidades e grandes empresas por todo o mundo, se tornando o centro de estratégias empresariais para manter a competitividade no mercado. Sistemas ciberfísicos são espinha dorsal da aplicação de indústria 4.0, habilitando uma produção colaborativa, eficiente e sustentável e integrando aquilo que antes era agrupado por “silos funcionais”. Isso acontece devido ao seu potencial de integração entre diferentes tecnologias, habilitando a aplicação da inovação em diferentes domínios, sejam setores tecnológicos ou econômicos. Trata-se aqui a representação de controle de processos para fábricas inteligentes através da integração ciberfísica e uso de ontologias na camada semântica. Para isso, revisitou-se arquiteturas de comunicação utilizadas em Indústria 4.0 que evoluem atualmente; além disso, construiu-se a ontologia para a integração da camada semântica da informação para um esquema clássico de controle de reator batelada; e elaborou-se a orquestragem e a coreografia para viabilizar a oferta de controle como um serviço para o processo. Para tanto, parte-se de controle de um reator do tipo batelada muito antigo cuja aplicação de controle em diagrama ladder era de 1979, anterior a norma IEC 61512 e IEC 61131 e reelaborou-se a estrutura de controle a partir da ontologia para Indústria 4.0, utilizando-se de OWL na sua forma mais conhecida em Engenharia Química, que é OntoCAPE. Assim, demonstra-se a capacidade da ontologia para gerar estruturas de controle no lado virtual de CPS (Cyber Physical System) com flexibilidade, e pronta para interoperabilidade, se necessário.

Palavras-chave: Sistemas Ciberfísicos, Controle de Processos, Indústria 4.0, Transformação Digital, Ontologia.

ABSTRACT

The emerging concept of Digital Transformation refers to the potential fourth industrial revolution. It took place within the Industrie 4.0 project through an economic development strategy proposed by the German government in 2011. Since then, the topic has been a matter of discussion in universities and large companies around the globe, becoming the center of business strategies to maintain competitiveness in the market. Cyber-physical systems are the backbone of the application of Industry 4.0, enabling collaborative, efficient, and sustainable production and integrating what were previously grouped by “functional silos”. This happens due to its potential for integration between different technologies, enabling innovation in many domains, whether technological or economic sectors. Also, it represents process control for smart factories through cyber-physical integration and the use of ontologies in the semantic layer. Therefore, communication architectures used in Industry 4.0 that is currently evolving were revisited and an ontology was built for the integration of the semantic layer of information for a classical batch reactor control scheme. Orchestration and choreography architectures were designed to make it possible to offer control as a service to the process. For that, it starts with the control of an old batch reactor case of use, whose control application in the ladder diagram is from 1979, before the IEC 61512 and IEC 61131 standards. Also, the control structure was redesigned from the ontology for Industry 4.0, using OWL in its best-known form in Chemical Engineering, which is OntoCAPE. Thus, it demonstrates the ability of an ontology to generate control structures on the virtual side of CPS (Cyber-Physical System) with flexibility; and ready for interoperability, if necessary.

Keywords: Cyber Physical Systems, Process Control, Industry 4.0, Digital Transformation, Ontology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comparativo de ciclo de “hype” de Tecnologias Emergentes.....	20
Figura 2: Comparativo entre fábrica atual e fábrica inteligente.....	21
Figura 3: Arquitetura 5C para sistemas ciberfísicos no cenário de indústria 4.0.	23
Figura 4: Representação generalizada de um CPS.....	24
Figura 5: Modelo de Hierarquia Funcional da ISA 95 (lado esquerdo), comumente apresentado em formato de pirâmide (lado direito). `.....	26
Figura 6: Evolução de modelo de arquitetura de comunicação.	26
Figura 7: <i>Overview</i> para controle de sistemas em batelada	30
Figura 8: Visualização de Modelo para Análise de Maturidade para Industria 4.0 – Gráfico de Radar.....	32
Figura 9: Estágios de Maturidade Digital do modelo ACATECH	33
Figura 10: Evolução tecnológica dos equipamentos de medição em processos	35
Figura 11: Representação conceitual de Sensores Inteligentes	36
Figura 12: Esquematização de <i>Industrial Wireless Network (IWN)</i>	37
Figura 13: Estrutura para arquitetura de OPC UA	40
Figura 14: Modelo Arquitetural da RAMI 4.0	41
Figura 15: Migração do controle tradicional para ciberfísico	43
Figura 16: Detalhe de uma arquitetura funcional para um CPS.....	44
Figura 17: Troca de informações entre processos utilizando Modular Type Package.	45
Figura 18: Exemplo de representação de uso de OPO combinado com uma ontologia de nível superior (<i>DUL Ontology</i>).	52
Figura 19: Exemplo de descrição e classificação de <i>core classes</i>	52
Figura 20: Exemplo de representação da integração entre a metodologia de VE com uma arquitetura conceitual.....	53
Figura 21: P&ID do sistema para controle de um reator batelada.....	54
Figura 22: Perfil de controle de temperatura para reator batelada.....	56
Figura 23: Diagrama de Ciclo de tempo para Controle Procedural de	58
Figura 24: Diagramas em <i>Ladder</i> para controle do reator batelada.....	60
Figura 25: Detalhe de Metamodelo para OntoCAPE	63
Figura 26: Visão geral do modelo parcial <i>chemical_process_system</i> da OntoCAPE.....	64
Figura 27: Ontologia para Controle de Processo no Domínio de RBatch.	66
Figura 28: Hierarquia de Classes no Protégé	67
Figura 29: Hierarquia de Classes via OntoViz.	69
Figura 30: Visualização gráfica de ontologia através do OntoGraph.	69
Figura 31: Abordagens para arquitetura de microserviços	73
Figura 32: Arquitetura de Microserviços como Orquestração vs Coreografia	74
Figura 33: Comunicação entre softwares.....	94
Figura 34: Tela do Matrikon OPC Server para Criação de Nova Tag.	95
Figura 35: Identificação de Servidor na Ferramenta <i>Online Links</i>	96
Figura 36: Componentes de um PI System e suas ferramentas.....	97
Figura 37: Fluxograma do Reator no Aspen <i>Plus</i>	99
Figura 38: Fluxograma do Reator no Aspen <i>Dynamics</i>	100
Figura 39: <i>Tags</i> para o Reator Batelada.	101
Figura 40: <i>Tags</i> do Reator Batelada Configuradas no OPC Client.....	101
Figura 41: Monitoramento de Variáveis na Árvore de Ativos do PI System.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Detalhamento da Instrumentação (Zoss, 1979).	55
Tabela 2: Lista de relações entre classes e suas respectivas descrições	68
Tabela 3: Serviços para Controle de Processos no Domínio de Aplicação	71
Tabela 4 - Resultados da Reação no Aspen Plus em Frações Molares (Adaptado de: LUYBEN, 2007).....	100

NOTAÇÃO

SÍMBOLO

SÍMBOLO GREGO

NOMENCLATURA

AT	Automation technology
AML	Automation Markup Language
API	application programming interface
CAEX	Computer Aided Engineering Exchange
CPS	Cyber Physical System
DCS	distributed control system
DOLCE	Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering
DUL	Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering Ultra-Light
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
I4.0	Industrie 4.0
IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things
IT	Information technology
IIRA	https://www.iiconsortium.org/IIRA.htm Industrial Internet Reference Architecture
IMC-AESOP	ArchitecturE for Service Oriented Process – Intelligent Monitoring and Control
ISA	International Society of Automation
ISO	International Standard Organization
MTP	NAMUR Modul Type Package
NAMUR	Normen-Arbeitsgemeinschaft für Mess- und Regeltechnik in der Chemischen Industrie - Standards Working Group for Measurement and Control Technology in the Chemical Industry
NIST	National Institute of Standards and Technology
OPC UA	OLE for Process Control Unified Architecture
OntoCA PE	Ontology for Computer Aided process Engineering
OPO	Observational Process Ontology

OT	Operation technology
OWL	Web Ontology Language
PCA	principal component analysis
PCR	principal component regression
PHD	Process History Database
PLC	programmable logic controller
PLS	partial least square
Process Net	German platform for process engineering, chemical engineering and technical chemistry. Joint initiative of DECHEMA and VDI-GVC
PSE	Process System Engineering
RAMI 4.0	Reference Architectural Model Industrie 4.0
RDF	Resource Description Framework
RDF-S	Resource Description Framework – Schema
SITAM	Stuttgart IT Architecture for Manufacturing
SAC	Standardization Administration of China
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SOA	Service Oriented Architecture https://www.ipvs.uni-stuttgart.de/departments/as/downloadgallery_as/groegech/Kassner_Stuttgart_IT_Architecture_for_Manufacturing.pdf
SNL	Structured Natural Language
UML	Unified Modelling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen - und Anlagenbau
XML	eXtensible Markup Language
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação para estudo	18
2	Objetivos	27
2.1	Geral	27
2.2	Específicos	27
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
3.1	Controle de Processos Químicos em Batelada.....	28
3.2	Tecnologias de Automação, Comunicação e Informação para Indústria 4.0	31
3.3	Ontologias e Indústria 4.0.....	46
4	DESCRIÇÃO DO CASO DE USO	54
4.1	Sistema Clássico para Controle de Reator Batelada	54
i.	Apertar Botão Iniciar HS-151	56
ii.	Iniciar contador de tempo KT-151A.....	57
iii.	Reiniciar contador de tempo KT-151	58
iv.	Iniciar contador de tempo KT-151B.....	58
v.	Reiniciar contador de tempo KT-151	58
5	CONTROLE DE PROCESSOS EM BATELADA PARA I4.0	61
5.1	Representação do domínio de estudo	61
5.2	Representação da aplicação: algoritmo de orquestragem e ambiente interpretador de ontologia.....	70
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	75
7	CONCLUSÃO	80
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
9	APÊNDICE A – ALGORITMOS PARA ORQUESTRAÇÃO E COREOGRAFIA	89
10	APÊNDICE B – simulando integração ciberfísica	94
	Matrikon OPC	95
	Simulação em Aspen Plus e Dynamics	95
	PI System	96
	MATLAB	98
	Aplicação da Integração	99

1 INTRODUÇÃO

Mesmo depois dos três consagrados exemplos anteriores (STEARNS, 2018), definir o que é uma revolução industrial não é algo trivial. Em primeiro lugar, porque é um conceito que só é aceito depois que ocorreu a “revolução”, contrariando o modo utilitarista de definir os termos. Em segundo lugar, porque uma “revolução industrial” nunca é revolução no sentido de ser abrupta, mas sim no de conservar a característica de ser uma mudança pervasiva e radical.

Desde o advento da máquina a vapor, os avanços tecnológicos são responsáveis por mudanças de grande impacto mundial. Estes, interferem no cotidiano da humanidade, diminuindo o tempo que se gasta para realizar atividades rotineiras e transformando desde sistemas econômicos até aspectos sociais, interferindo na maneira que nos comunicamos, interagimos e nos deslocamos.

O lançamento do consórcio “*Industrie 4.0*” (SCHWAB, 2016), em 2011, provocou a emergência de uma série de novos conceitos e discussões para o cenário industrial mundial¹. Ao passo que há uma grande oferta de evolução tecnológica em Internet Industrial das Coisas (IIoT), Sistemas Ciberfísicos e Computação em Nuvem,

¹ <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/EN/Industrie40/WhatIsIndustrie40/what-is-industrie40.html>

Embora as origens alemãs do conceito da Indústria 4.0 estejam bem documentadas, as diferentes iniciativas similares foram impulsionadas pela tecnologia, tais como *US Advanced Manufacturing Partnership* em 2012, e *European Factories of the Future Program* em 2013. A força do conceito se nota em lançamentos posteriores como “*Made in China 2025*”, “*La Nouvelle France Industrielle*”, e no Brasil “*Rumo à Indústria 4.0*”, para citar poucos exemplos.

Há um razoável sobreposição entre o conceito de IIoT - Internet Industrial de Coisas e I4.0 - Indústria 4.0, inclusive em solapamento entre as perspectivas do modelo de negócios e da realização tecnológica de fluxo de trabalhos. Utiliza-se aqui uma idéia simples da *Industrial Internet Consortium* – “*What Is the Industrial Internet*”, de que a internet industrial é uma IoT (internet de coisas), máquinas, computadores e pessoas que permite operações industriais inteligentes usando análise avançada de dados para resultados “transformacionais” de negócios, e que está redefinindo o cenário para empresas e indivíduos.

Muito se evoluiu das ideias iniciais de I4.0, e aqui utiliza-se a idéia de que Indústria 4.0 é um termo que agrega as tecnologias e conceitos de organização da cadeia de valor. Nas “Fábricas Inteligentes” de estruturas modulares da Indústria 4.0, CPS (*Cyber Physical System*) monitora os processos físicos, cria uma cópia virtual do mundo físico e toma decisões descentralizadas. Na IoT (*Internet of Things*), CPS se comunicam e cooperam entre si e com humanos em tempo real. Por meio da IoS (*Internet of Services*), serviços internos e interorganizacionais são oferecidos e utilizados pelos participantes da cadeia de valor. (Hermann, M., Pentek, T., Otto, B. (2015). Design principles for Industrie 4.0 scenarios: a literature review. *Working Paper 01/2015. Technische Universität Dortmund*). Por isso se diz que CPS é um backbone de I4.0.

surge a “Manufatura Inteligente”, fazendo referência a elementos e conexões “*smart*” entre processos, máquinas e seres humanos. No Brasil, o termo “transformação digital” é utilizado para caracterizar a Indústria 4.0, no sentido de convergência entre OT (*operation technology*), IT (*information technology*) e AT (*automation technology*).

Existem muitas perspectivas e definições para CPS tentando privilegiar seus potenciais específicos na fabricação e em muitos outros domínios de aplicação. Entretanto, há uma falta de entendimento comum do que é CPS nesses domínios; e ainda mais, a crença falsa de que o contexto da digitalização global alcançado a partir da Indústria 4.0 e a Internet das Coisas, já está amadurecido. Acredita-se que CPS será um dos paradigmas para sistemas de controle do futuro, mas deve-se alertar de que não se pode confundir CPS com aplicações avançadas de técnicas de controle, ou seja, CPS habilita, mas não é somente uma aplicação de controle. Aqui, o termo se refere a integração de sistemas computacionais e processos físicos.

A primeira fase de CPS, com o sentido clássico de disponibilização da estrutura computacional, ao analisar no contexto de IIoT (arquitetura lógica, comunicação, integração, digitalização incluindo gêmeos digitais, computação em *cloud* e em *fog*, e muitos outros aspectos), já se encontra ultrapassada pela segunda fase, dados os desafios que o contexto traz. Considera-se aqui que o lado físico terá a sua evolução natural devido a demanda de tecnologias adequadas para IIoT. A parte virtual, por outro lado, devido a massa de dados e a distribuição em rede de vários componentes computacionais e vários sistemas físicos, obriga que sistemas ciberfísicos tragam, por conceito, a capacidade de monitorar, coordenar e controlar os núcleos de comunicação e computação de um modo reconfigurável (mesmo que não se reconfigure automaticamente como uma das suas tarefas). Essa característica atual da lógica da arquitetura de CPS é o que traz desafios técnicos e torna esse tipo de sistema mais adequado aos aspectos de interoperabilidade e flexibilidade junto com integração vertical e horizontal desejada pelos conceitos de I4.0, dentro de CPS para controle de processos industriais.

O terceiro CPS, do futuro, provavelmente será uma arquitetura que aprende e se reconfigura sozinha. Esse futuro ainda está longe, porque CPSs ainda estão na segunda fase, atual, e devem amadurecer em termos de entendimento de arquiteturas lógicas.

A integração de partes físicas e virtuais em um processo industrial viabiliza o direcionamento e adequação dos aspectos produtivos para o ciclo de vida do produto

de modo personalizado para o cliente. Para uma “*smart factory*”², a troca de informações nos processos deixa de ser apenas como indica a norma ANSI/ISA-95³, onde funcionava de maneira verticalizada e hierárquica, em camadas com diferentes protocolos de comunicação entre si, e passa a ter características de colaboração *machine-to-machine* e *machine-to-human* através da conexão por redes de sistemas embarcados e/ou internet através dos sistemas ciberfísicos (HOFMANN et al., 2012).

Apesar de acelerada pela pandemia, embarcar e percorrer na jornada de transformação digital é algo que se mostra desafiador, principalmente para empresas com um grande legado tecnológico e necessidade de adaptação de infraestrutura, visto que uma rápida adequação do ambiente fabril às mudanças proporcionadas pela tendência mundial de avanço tecnológico e digitalização se faz necessária (SANTOS et al., 2018).

Dentro do contexto de engenharia de sistemas e processos químicos, para processos em batelada, a aplicação de diversas técnicas avançadas para análise e estimação de estado, controle preditivo de sistemas e diagnóstico de falhas estão disponíveis para uso no contexto de Indústria 4.0, onde surge um horizonte de grande potencial de sua implementação, principalmente quando tais ferramentas são aliadas as camadas de intertravamento e alarmes, otimização e *scheduling* (receita). Já para

² Como em conceitos das áreas emergentes, Smart Factory (fábrica inteligente) é definida em múltiplas perspectivas. Sob a perspectiva da produção inteligente centrada no CPS (*Cyber Physical System*), para alguns autores, é um sistema de manufatura integrado baseado em rede hiper conectado que adquire todas as informações sobre as instalações fabris em tempo real através da Internet, altera autonomamente um método de fabricação, substitui matérias-primas e, finalmente, implementa um sistema de produção dinâmico otimizado. Para outros, é um CPS de fabricação que integra objetos físicos como máquinas, transportadores e produtos com sistemas de informação, como sistemas de execução de manufatura e planejamento de recursos, para implementar uma produção flexível e ágil. Ainda, uma fábrica inteligente é um sistema de produção inteligente que integra comunicação processo, processo de computação e processo de controle na fabricação e serviços para atender às demandas industriais. Outros definem fábrica inteligente como um sistema de manufatura flexível que usa um fluxo contínuo de dados de operações conectadas e sistemas de produção para aprender e se adaptar às novas demandas. Ainda se define fábrica inteligente como um sistema de manufatura auto-organizado e assistido na nuvem, no qual entidades físicas organizar a produção por meio de negociação inteligente e supervisiona este processo auto-organizado para detecção de falhas e solução de problemas com base na análise de dados. Apesar das várias definições, o objetivo da fábrica inteligente é aumentar a reutilização sistemática de processos e melhorar o entendimento das estruturas complexas em processos de fabricação. A fábrica inteligente visa construir CPS para implementar integração vertical de entidades físicas e sistemas de informação para que processos de produção extremamente flexíveis e auto adaptáveis com máquinas e produtos que atuam de forma inteligente e autonomamente pode ser finalmente alcançado. Shi, Z. et al. (2020). Smart factory in Industry 4.0. *Systems Research and Behavioral Science*, 37(4), 607-617.

³ ISA95, Enterprise-Control System Integration <https://www.isa.org/isa95/>.

os processos contínuos, o que se espera é a viabilização de representação das várias camadas funcionais inerentes ao sistema, onde as atividades de ontologia têm seu campo específico de conhecimento, estando diretamente relacionadas a integração das atividades de análise de desempenho, gestão da qualidade e de materiais e produtos.

Com suas tarefas de pesquisar, acessar, compreender e, por fim, utilizar as informações de todas as fontes de dados CPSs podem conter procedimentos repetitivos, demorados, manuais ou sujeitos a erros e até mesmo a mudança na morfologia da rede. Por isso, há um desafio em tornar esse tipo de sistema “semanticamente interoperável”, no sentido da capacidade técnica de trocar dados com um inequívoco significado compartilhado, ou seja, com a capacidade de “entender” outros componentes da comunicação. As ontologias são ferramentas como uma representação tecnológica de tais modelos de informação em formato interpretável por uma “máquina”, e uma representação conceitual para entender os termos e as relações de um domínio. Uma ontologia pode assumir uma variedade de formas, mas incluirá, necessariamente, um vocabulário de conceitos e alguma especificação de seu significado. Isso inclui definições e uma indicação de como os conceitos estão inter-relacionados, o que impõem coletivamente uma estrutura no domínio e restringem as possíveis interpretações de conceitos (HILDEBRANDT et al., 2020). Esta descrição complementa melhor o conceito muito geral de que “a ontologia é a conceitualização formal da representação de conhecimento e prove definição de conceitos e relações capturando o conhecimento de um domínio de modo interoperável” (ver GUARINO, N., OBERLE, D., STAAB, S., 2009 e KUMAR et al., 2019). Ainda não existem maneiras de geração automática de ontologias e há muitas formas de estruturar ontologia quando se refere ao contexto de I4.0.

No presente trabalho de dissertação, é representada a readequação das tecnologias disponíveis atualmente para o contexto de indústria 4.0, através da estrutura de integração de informações para controle de processos industriais em fábricas inteligentes.

Nele, é realizada uma análise de impactos futuros no cenário industrial a partir da representação de fábricas inteligentes, fazendo uso de integração ciberfísica e de ontologias na camada semântica de processos industriais, onde as aplicações são

realizadas para uma estrutura clássica de controle de um reator batelada baseado em Zoss (1979).

1.1 Motivação para estudo

Apesar de muito mencionado entre os universos acadêmico e corporativo, o termo “transformação digital” ainda não possui definições de comum acordo, visto que os conceitos relacionados ao tema se encontram difusos entre os membros da academia e indústria. Em contrapartida, a quantidade de artigos publicados com as palavras “Cyber Physical Systems”, “Industrie 4.0” e “Digital Transformation” é exponencial e demasiada nos últimos anos, acompanhando a necessidade de mercado na busca por caminhos e estratégias a fim de se adequar ao cenário de transformação que vai do nível de business até o “chão de fábrica” em diferentes áreas de aplicação (HOFFMANN et al., 2016).

O conceito de “Transformação Digital” faz referência a potencial quarta revolução industrial e sua emergência ocorreu dentro do projeto Industrie 4.0 através de uma estratégia de desenvolvimento econômico proposta pelo governo alemão no ano de 2011. Desde então, o tema tem sido alvo de discussão em universidades e grandes empresas por todo o mundo, se tornando o centro de estratégias empresariais para manter a competitividade no mercado (ZHOU et al., 2015).

Tal transformação tem impactos em diversas áreas da sociedade, influenciando desde os estilos de vida até a produção industrial, o que faz com que a interdisciplinaridade seja algo inerente ao processo de inovação para as áreas tecnológicas, onde os profissionais poderão explorar futuras possibilidades através de tecnologias como *Big Data e Data Analytics*, Robôs Autônomos, Simulação, Integração de Sistemas (horizontal e vertical), Internet Industrial das Coisas (IIoT), Ciber Segurança, Computação em Nuvem, Manufatura Aditiva (Impressão 3D) e Realidade Aumentada. (CHENG et al., 2016).

Os impactos das evoluções tecnológicas são discutidos por diversos artigos, como é o caso do trabalho proposto por Rüßmann et al. (2015), onde os autores discutem sobre os nove pilares da indústria 4.0 e suas influências nas indústrias de

manufatura, usando a economia alemã como exemplo e ressaltando impactos positivos em produtividade, crescimento da receita, geração de empregos e investimento na transformação para a indústria digital.

Apesar de muitas das tecnologias mencionadas já estarem presentes em ambiente industrial, ao trazê-las para o contexto de indústria 4.0, é prevista uma transformação de produção, onde surgirão elementos inteligentes, ou seja, elementos autônomos com capacidade de comunicação (por causa da IIoT) e cooperação (por causa do CPS), sendo capazes de tomar decisões e executar ações a partir da troca de informações.

Assim como o termo mencionado acima, “tecnologia emergente” também é um conceito amplo e mencionado em demasiado no universo da quarta revolução industrial (HALAWEH, 2013). “Emergente”, neste contexto, pode se tratar de um indicativo para descrever uma nova tecnologia ou indicar o desenvolvimento contínuo de uma tecnologia já existente (ROTOLO, 2015).

Kerin e Pham (2019) trazem uma análise de bases de dados de publicações relacionadas a tecnologias utilizadas no contexto de manufatura inteligente, além de insights em tendências e oportunidades no assunto.

Frank et al. (2019) propõem uma estrutura para agrupamento de tecnologias para indústria 4.0, dividindo-as entre tecnologias base (*IoT, Nuvem, Big Data e Analytics*) e tecnologias de *front-end* (*Smart Products, Smart Manufacturing, Smart Working e Smart Supply Chain*), que são tratadas como tendências de operação e mercado.

Sendo assim, com o avanço tecnológico transformação digital e o ambiente de entusiasmo propiciado pelos conceitos de Indústria 4.0, surgem possibilidades que muitos pesquisadores e fornecedores de tecnologia veem como animadoras para aplicar as teorias de controle em áreas não imaginadas antes. Tais como: aplicações em cadeia de suprimentos, integração de planejamento e scheduling corporativo ao meio produtivo, sistemas de gestão e outros aspectos empresariais de negócios (IVANOV et al., 2018).

A Figura 1 mostra dois gráficos de tendência para adoção de tecnologias emergentes a partir de uma avaliação da empresa Gartner⁴, que foca em consultoria e pesquisa para tecnologia da informação.

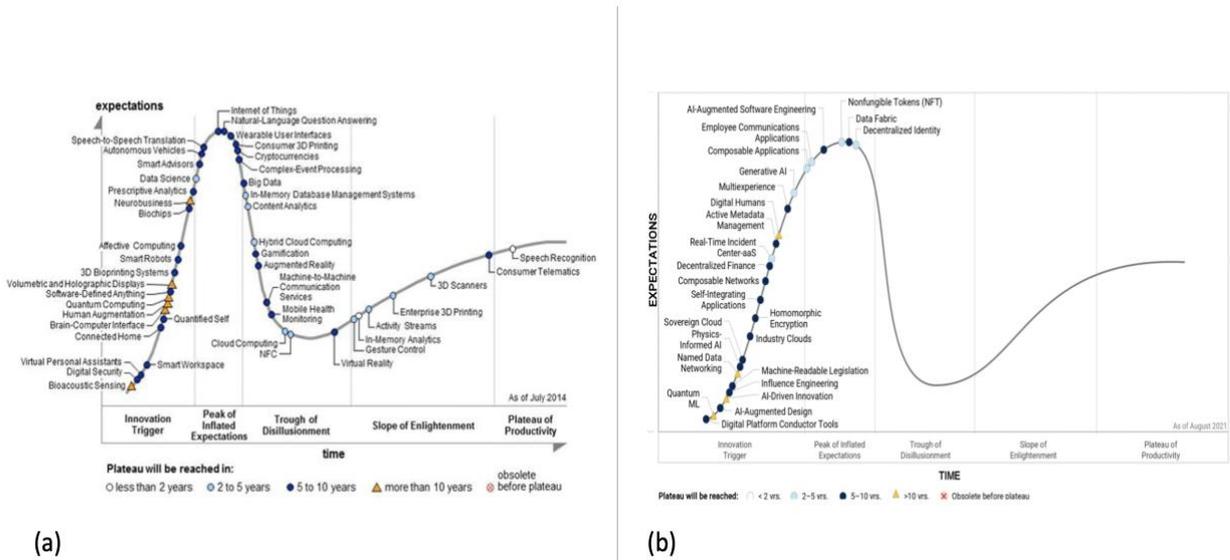


Figura 1: Comparativo de ciclo de “hype” de Tecnologias Emergentes.

Fonte: (a) *Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2014* (b) *Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2021*

O prefixo “*smart*” é frequente utilizado dentro do contexto de indústria 4.0 e faz referência a elementos inteligentes aplicados ao ambiente fabril, diferenciando as técnicas tradicionais de controle, integração de sistemas e monitoramento de operações e processos daquelas utilizadas com novas tecnologias que habilitam uma produção flexível no sentido de ser digitalmente integrada.

A rápida digitalização serve como agente impulsionador da indústria 4.0 e sua inegável influência em sistemas de produção é tida como a porta de entrada para o caminho que leva até a “fábrica que pensa” do inglês, *smart factory*. Com ela, vários setores econômicos e sociais são impactados, o que impulsiona o surgimento de novas tecnologias e possibilita que aplicações inovadoras sejam cada vez mais factíveis.

⁴ <https://www.pewresearch.org/fact-tank/2014/08/15/chart-of-the-week-the-hype-cycle-of-emerging-technologies/>

<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2021-08-23-gartner-identifies-key-emerging-technologies-spurring-innovation-through-trust-growth-and-change>

De acordo com o Gartner⁵, uma “fábrica inteligente” (do inglês, *smart factory*) ou “fábrica digital”, é o termo utilizado para conceituar um ambiente fabril submetido ao cenário de transformação digital. Nela, tecnologias modernas podem aplicadas de diversas maneiras para viabilizar uma produção hiperflexível, interoperável e auto adaptável. Tal conceito abre horizontes para a conexão de diferentes processos, sistemas e pessoas, desde a linha de operação até *business owners*. A Figura 2, a seguir, demonstra uma comparação entre atributos e tecnologias de uma fábrica atual e inteligente.

Comparação: Fábrica Atual e Fábrica Inteligente (Smart Factory)

	Fonte de Dados	Fábrica Atual		Fábrica Inteligente (Smart Factory)	
		Atributos	Tecnologias	Atributos	Tecnologias
Componente	Sensor	Precisão	Sensores Inteligentes e detecção de falhas	Autoconsciente Auto previsão	Monitoramento de Degradação e Previsão de Ciclo de Vida
Máquina	Controlador	Produtibilidade e desempenho	Monitoramento e Diagnóstico Baseado em Condições	Autoconsciente Auto previsão Auto comparação	Monitoramento do Tempo de atividade com predição de saúde do sistema
Sistema de Produção	Sistema em Rede	Produtibilidade e Eficácia geral do equipamento	Operações enxutas (lean): Redução de desperdício e trabalho	Auto configuração Auto manutenção Auto organização	Produtividade Sem Preocupações

Figura 2: Comparativo entre fábrica atual e fábrica inteligente.
Fonte: LEE et al. (2015)

Com a demanda de setores como automação, petróleo e gás, farmacêutico, meio ambiente e aeroespacial por unidades industriais mais inteligentes, surge também a necessidade de engenhar sistemas que integrem as partes físicas e virtuais dos processos, estes, são chamados de Sistemas Ciberfísicos, (CPS - Cyber Physical Systems), e se caracterizam pelo alto nível de integração entre as divisões de comunicação através da descentralização das camadas de controle.

Através do rápido desenvolvimento das tecnologias relacionadas a informação, aumento de banda de internet, inovações em comunicação wireless e

⁵ <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/smartfactory#:~:text=The%20smart%20factory%20is%20a,%2C%20self%2Dadapting%20manufacturing%20capability.&text=Smart%20factory%20initiatives%20might%20also,%E2%80%9D%20or%20%E2%80%9Cintelligent%20factory.%E2%80%9D>

desenvolvimento de smart sensors, elementos computacionais passam a ter uma maior capacidade de processamento e menor consumo de energia, o que viabiliza a melhoria no design e integração de sistemas de controle de processos industriais. Assim como a internet (interconnected network), que causou um impacto mundial nas conexões, relacionamentos e comércio, os sistemas ciber-físicos têm a capacidade de mudar a maneira como interagimos com o meio ao nosso redor (HU, 2013) (LEE, 2008).

Sistemas ciberfísicos são espinha dorsal da aplicação de indústria 4.0, habilitando uma produção colaborativa, eficiente e sustentável e integrando aquilo que antes era agrupado por “silos funcionais”. Isso acontece devido ao seu potencial de integração entre diferentes tecnologias, habilitando a aplicação da inovação em diferentes domínios, sejam setores tecnológicos ou econômicos (SERPANOS, 2018).

Jazdi (2014) define CPSs como sistemas embarcados com interface para comunicação com outros sistemas e/ou com a nuvem, onde há uma (ou mais) unidade(s) de controle de um processo através de sensores e atuadores.

De acordo com Meissner (2017), um sistema ciberfísico aplicado a um ambiente produtivo é a integração de sistemas embarcados e internet para a conexão de objetos físicos. Este, possui um alto nível de integração entre produtos e processos, em que os elementos da cadeia produtiva têm a característica “smart” como um pré-requisito. Nesse contexto, há uma dissolução da hierarquia de comunicação e de controle, o que possibilita que os elementos inteligentes tenham autonomia até um certo nível de decisão e não dependam de uma rede centralizada.

Através desse tipo de sistemas, interações mais robustas e flexíveis entre a parte física de processos e recursos computacionais disponíveis são viabilizadas. Portanto, CPSs servem como *backbone* para a transformação digital (TAHA, 2018).

Um exemplo de sistema ciberfísico aplicado no cotidiano é dado por Hu (2013), onde o autor mostra o sistema de freio antibloqueio, do inglês, *Anti-lock Braking System* (ABS), que é usado em carros modernos para a prevenção de acidentes. O sistema contém sensores que coletam as informações de rotação de cada roda do veículo e enviam essa informação para uma unidade de processamento. Quando um sensor detecta que uma das rodas está prestes a travar, uma série de comandos é

enviada para as pastilhas de freio, fazendo com que o motorista reduza o tempo de frenagem e não perca o controle da direção devido a uma freada brusca.

Representações sistêmicas através de modelos matemáticos, em geral, conseguem representar bem somente a parte física ou apenas a parte virtual dos processos, e não as duas simultaneamente. CPSs ficam na fronteira entre o que é *cyber* e o que é físico e detêm a capacidade de realizar uma interação colaborativa entre os elementos que são parte do sistema, de maneira que a produção seja eficiente, individualizada e sustentável (LEVINE, 2011).

A colaboração em um CPS depende de três fatores, são eles: capacidade computacional, capacidade de controle e comunicação. Ou seja, os dispositivos dentro da rede de comunicação (IIoT), nesta abordagem, passam a ser multitarefas, interativos e a entender o contexto do sistema (*contexto-aware devices*) (KRÄMER et al., 2014).

Lee et al. (2015) propõem uma arquitetura baseada em 5 componentes para integração de sistemas ciberfísicos ao cenário de manufatura para indústria 4.0, representada na Figura 3, a seguir.

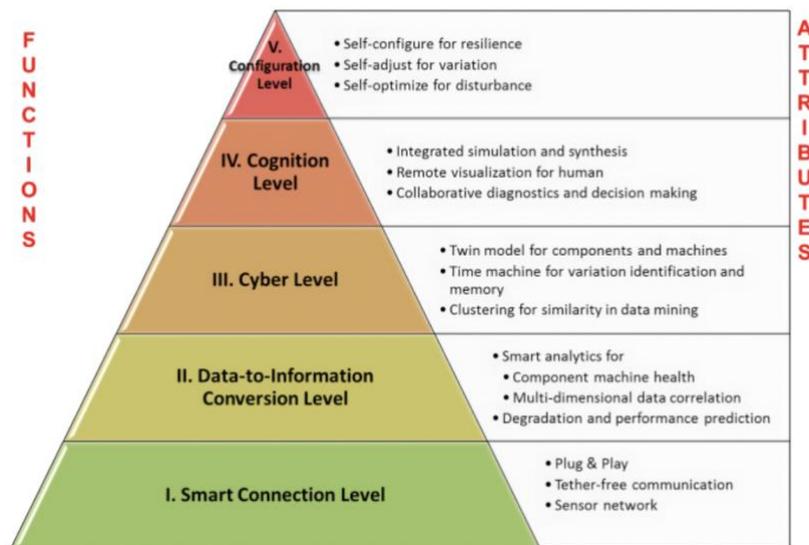


Figura 3: Arquitetura 5C para sistemas ciberfísicos no cenário de indústria 4.0.

Fonte: LEE et al. (2015)

A Figura 4, descreve uma arquitetura generalizada de CPS. Nela, são representados os *networked agents* (sensores, atuadores, dispositivos de comunicação e controladores) onde as operações podem ser monitoradas, coordenadas, controladas e integradas através de um sistema de informação (computação e comunicação) (BARRETO et al., 2017).

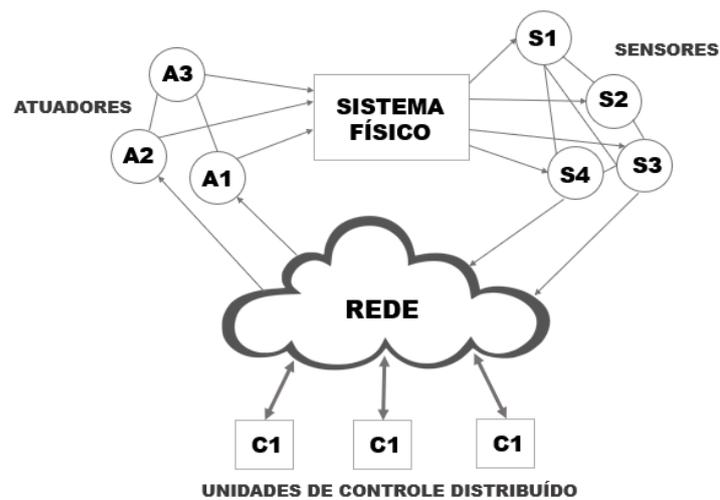


Figura 4: Representação generalizada de um CPS

Adaptado de: BARRETO et al. (2017)

Um conceito que está diretamente relacionado com CPSs é o de *Big Data Analytics*, termo utilizado para designar análises referentes a uma quantidade massiva de dados, o que ocorre devido ao fato de que sistemas ciberfísicos trabalham com informações simultâneas no processo, saindo das limitações impostas pelo controle tradicional (baseado em *feedback*). Isso possibilita o uso de observadores e estimadores complexos no processo que podem ser utilizados dentro de algoritmos de *machine learning*, por exemplo, onde é possível realizar uma comparação com o gêmeo digital (*digital twin*) do processo.

Para a disciplina de engenharia de processos químicos, é de comum acordo, que, para o benefício de uma unidade fabril, é preciso que as variáveis importantes para os sistemas de produção estejam dentro das faixas de operação desejadas, levando em consideração as limitações de segurança e dos equipamentos envolvidos.

Sendo, portanto, essencial que as aplicações de controle de processos em ambiente industrial se adequem ao surgimento de novas tecnologias visando a assegurar a qualidade no funcionamento de sistemas e seus produtos.

Para a disciplina de engenharia de sistemas e processos (do inglês, *Process System Engineering*, PSE), as tendências de conceitos em indústria 4.0 apontam para a integração da automação com uma abordagem holística no sentido de que as informações vão estar disponíveis para serem usadas, estudadas e trabalhadas, seja do ponto de vista de negócios ou manufatura, com uma arquitetura de informação mais flexível, de maneira a possibilitar a disponibilização das informações de processo.

Na perspectiva de controle de processos em transformação digital, a informação fica disponível em uma nuvem de dados. Assim, o próprio sistema, a partir da informação disponível que circula flexível e interoperavelmente, possibilitando a oferta serviços inteligentes para os sistemas interligados.

Ainda nesse contexto, *Process History Databases* (PHDs) de processos industriais, sejam eles contínuos ou em batelada, são vistas como *commodity* pelas empresas devido a possibilidade de extração de informações importantes para a tomada de decisões estratégicas à nível de business. Métodos como análise de componentes principais (PCA), Regressão de Componentes Principais (PCR) e Mínimos Quadrados Parciais (PLS) são usados para análise e extração de dados em sistemas (LEVINE, 2011).

As Figuras 5 e 6 ilustram o modelo funcional tradicional da ISA-95 e a evolução de modelo hierárquico (pirâmide) de comunicação para troca de informações em processos através de uma rede estruturada⁶.

⁶ <https://www.isa.org/intech-home/2021/october-2021/features/beyond-the-pyramid-using-isa95-for-industry-4-0-an>

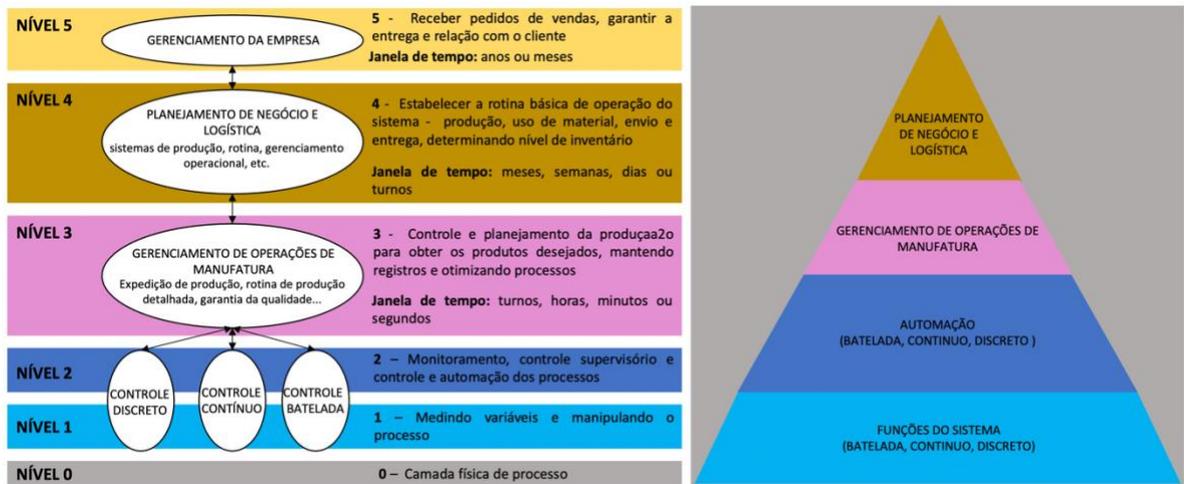


Figura 5: Modelo de Hierarquia Funcional da ISA 95 (lado esquerdo), comumente apresentado em formato de pirâmide (lado direito).
Adaptado de BRANDL e JOHNSON, 2021.

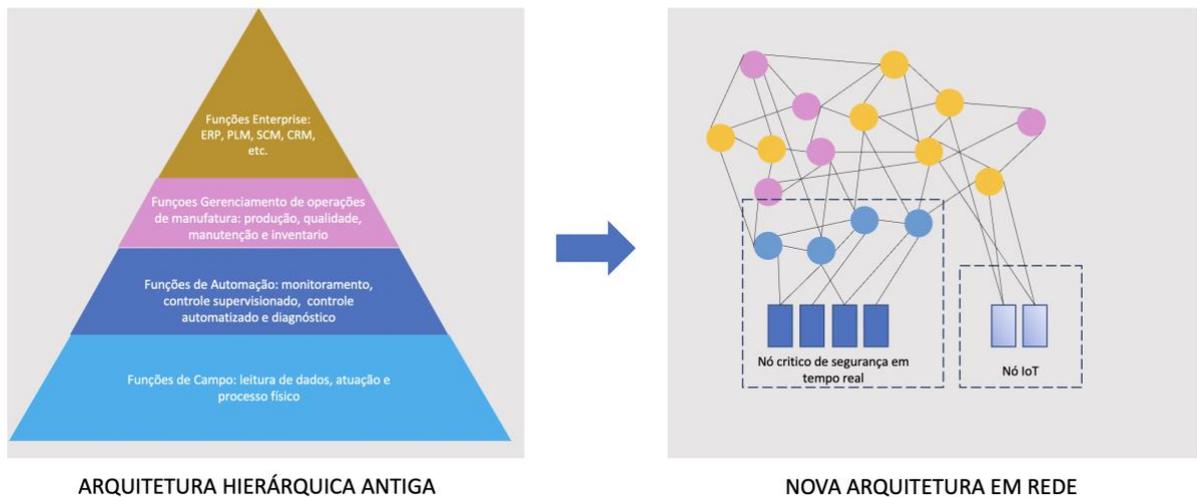


Figura 6: Evolução de modelo de arquitetura de comunicação.
Adaptado de BRANDL e JOHNSON, 2021.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O trabalho de dissertação tem como objetivo principal a representação de controle de processos para fábricas inteligentes através da integração ciberfísica e uso de ontologias na camada semântica.

2.2 Específicos

- Listar arquiteturas de comunicação utilizadas em Indústria 4.0 que evoluem atualmente.

No trabalho, a sessão 3.2 do capítulo 3 é dedicada a fazer a revisão de tais normas e dos principais conceitos tecnológicos que fundamentam o cenário atual para manufatura inteligente.

- Construir ontologia para a integração da camada semântica da informação para um esquema clássico de controle de reator batelada.

A conceituação de ontologia e de suas aplicações em PSE e transformação digital é realizada no item 3.3 da dissertação; o detalhamento do domínio de estudo onde a ontologia é aplicada é realizada detalhadamente no capítulo 4 e a construção da ontologia no item 5.1.

- Elaborar orquestragem e a coreografia para viabilizar a oferta de controle como um serviço para o processo.

A aplicação da camada semântica em processos inteligentes, é detalhada no item 5.2, onde um conjunto de serviços é descrito e aplicado para o controle de processos no reator batelada que é objeto de estudo na dissertação. O apêndice A ilustra pseudocódigos para tal aplicação.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Controle de Processos Químicos em Batelada

Processos em batelada são geralmente usados para unidades com múltiplo propósito, sendo aplicados para uma diversidade de processos químicos em indústrias como por exemplo as farmacêuticas, saneantes, alimentícias e de polímeros. Neles, reagentes são manipulados de maneira que produtos de alto valor agregado sejam manufaturados de acordo com as especificações desejadas, seguindo uma sequência de operações onde cada produto tem uma receita específica (JAYAKUMAR et al., 2011).

Para que sejam economicamente viáveis, os ciclos são repetidos de modo que uma grande quantidade de produto desejado seja atingida. Um dos principais desafios em sistemas em batelada é maximizar a produção de cada equipamento disponível visto que uma de suas principais características é que seu sistema de produção seja utilizado na manufatura de diferentes produtos (ZHANG, 2004).

O controle de processos em batelada envolve uma sequência com diferentes etapas dentro do ciclo. Ao contrário dos processos contínuos, é realizada a análise discreta de eventos e lógica binária para esse tipo de sistema, o que requer um Controlador Lógico Programável (PLC) ou Controle Distribuído (DCS) (ZOSS, 1979).

No contexto de *smart factory*, analisando as condicionantes para aplicação de controle de processos, com relação a maturidade e produção de processos químicos de batelada, é preciso que sejam avaliados os seguintes fatores:

1. As tecnologias e as quantidades da instrumentação no chão da fábrica estão prontas para Indústria 4.0?
2. As comunicações e seus protocolos estão adequados?
3. Consegue-se integrar vertical e horizontalmente as informações e as atuações das decisões?
4. A capacidade computacional e softwares operacionais estão prontos para Indústria 4.0?

5. É possível dissolver as ilhas *cyber* funcionais mantendo conceitualmente esses subsistemas como modulares? (flexibilidade e interoperabilidade)
6. Há uma quantidade e variedade suficiente das variáveis do processo disponíveis como dados, de modo a levantar as relações entre essas variáveis e seus atributos para diagnosticar e tomar ações de controle de modo diferente do tradicional?
7. Existe um planejamento claro do que se deseja com a transformação digital?
8. Há arquitetura física e virtual robusta em termos de segurança?

Segundo Seborg et al., (2017), um processo em batelada opera em quatro diferentes níveis de operação. São eles:

- **Sequência do Ciclo e Lógica de Controle:** onde são cumpridas as operações sequenciais como enchimento do reator com reagentes, aquecimento, resfriamento e descarga de produto.
- **Controle Durante o Ciclo:** nível em que estratégias de controle são aplicadas. Para sistemas mais simples, variáveis de processos podem ser levadas até o *set-point* ou mantidas constantes por um período específico, já para os mais complexos, se faz necessária uma trajetória da variável em função do tempo do ciclo. Vale salientar que o término do ciclo (*end-point*) é definido a partir de medições inferenciais relacionadas a qualidade do produto, quando a realização de medições diretas não é possível.
- **Controle *Batch-to-Batch* (*Run-to-Run control*):** devido a característica de repetição de ciclos, é possível obter informações a fim de melhorar a qualidade na produção de bateladas futuras. Aplicações de controle *run-to-run* para processos em batelada são encontradas nos trabalhos de Liu et. al. (2018), Campbell et al. (2002) e Del Castillo e Hurwitz (1997).
- **Gerenciamento de Produção da Batelada:** o controle e gestão de tais sistemas implica na programação da batelada de acordo com a disponibilidade de matéria prima e demanda de produção. Normas como

a IEC 61512, por exemplo, descrevem padrões quanto à receita e fluxograma de produção para tais processos.

Na Figura 7, é representada uma generalização para controle de processos em batelada.

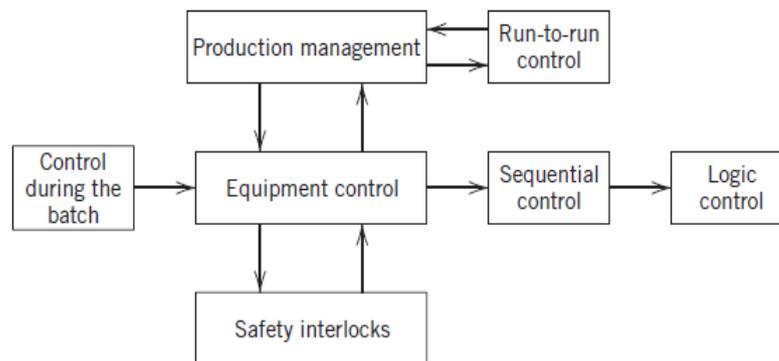


Figura 7: Overview para controle de sistemas em batelada

Fonte: SEBORG et al. (2017)

3.2 Tecnologias de Automação, Comunicação e Informação para Indústria 4.0

A presente sessão serve como um guia que visa a centralizar as informações sobre as tecnologias emergentes e em evolução para a aplicação da transformação digital em ambiente industrial, dado o aumento significativo na quantidade de artigos científicos sobre o referido assunto. Além disso, é feito um levantamento dos padrões (*standards*), *roadmaps* tecnológicos e tecnologias utilizadas em diferentes ramos da engenharia quanto as tecnologias de comunicação e informação, no contexto de *industrie 4.0*.

Os benefícios da adesão a transformação digital são reconhecidos por grandes empresas dentro do cenário industrial⁷. Dentro desse contexto, a adequação de organizações ao ecossistema de inovação, onde há grande foco em construir uma cultura centrada no cliente (*customer centric*)⁸, permite que as companhias tenham resposta rápida diante da dinâmica do mercado, desenvolvendo novos produtos com maior velocidade e precisão, alinhando-se aos requerimentos do consumidor, e lançando-os a frente de seus concorrentes.

Modelos de maturidade e prontidão para Indústria 4.0 são um instrumento para capturar uma visão macro de suas práticas e efetividade, refletindo aspectos da realidade da companhia e podendo ser mensurada qualitativamente ou quantitativamente (AKDIL et al., 2018).

Enquanto o termo “prontidão” se refere ao processo de avaliação que ocorre antes do processo de amadurecimento, “maturidade”, que é descrita por Nikkhou et al. (2016) como o fato de estar em perfeitas condições para algo, tendo evidência de sucesso em procedimentos e clareza para tomada de decisões para a correção ou prevenção de problemas remete ao processo de avaliação e captura do estado de madureza da empresa frente a boas práticas de mercado e tendências mundiais.

⁷ <https://www.automation.com/en-us/articles/february-2021/schneider-electric-collaboration-industries-future?listname=Automation%20&%20Control%20News%20&%20Articles>

⁸ <https://www.reveall.co/guides/customer-centricity>

Schumacher et al. (2016) fazem um levantamento de modelos de maturidade e prontidão disponíveis no mercado e propõem um modelo que considera nove dimensões de negócio, sendo elas: estratégia, liderança, clientes, produtos, operações, cultura, pessoas, governança e tecnologia. Visando a mapear a complexidade de aplicação e identificar dificuldades e tomando base em pesquisas com pesquisadores e pessoas de mercado, os autores ressaltam os seguintes problemas quando se aplica conceitos de Indústria 4.0:

- Sem orientação estratégica adequada, as empresas entendem que os conceitos de Indústria 4.0 como altamente complexos;
- Incerteza sobre entrega de valor através de projetos de transformação, quando se trata de custo e benefício;
- Falta de avaliação de suas próprias capacidades de transformação digital, o que impossibilita a tomada de decisão assertiva e coordenada.

Em seguida, a Figura 8 representa a visão de gráfico de radar do modelo proposto pelos autores acima referidos a fim de avaliar maturidade e prontidão.

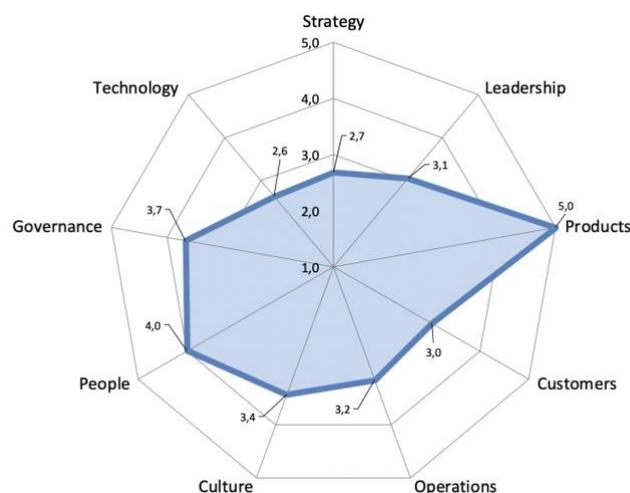


Figura 8: Visualização de Modelo para Análise de Maturidade para Indústria 4.0 – Gráfico de Radar

Fonte: SCHUMACHER et al. (2016)

Dessa maneira, o desenvolvimento de modelos multidimensionais de maturidade e prontidão são de fundamental importância para o entendimento dos conceitos relacionados a tal aplicação dentro do contexto industrial, possibilitando

que as indústrias tenham um caminho metodológico para a avaliação customizada e individual de sua madureza e permitindo a criação de seus próprios *roadmaps*.

Alguns exemplos de modelos de maturidade digital são encontrados na literatura, como o disponibilizado pela academia alemã de tecnologia, o “ACATECH *Industrie 4.0 Maturity Index*”, que tem sua estrutura baseada em uma sucessão de níveis de maturidade, com três fases de aplicação, sendo elas: 1. Identificação do Estágio atual de Maturidade; 2. Mapeamento de Capacidades a Serem Adquiridas; 3. Identificação de Medidas Concretas, onde o “estágio alvo” depende da estratégia de negócios, o modelo busca fazer com que a companhia navegue por todos os estágios da transformação digital, cobrindo desde os requisitos básicos até sua completa implementação (ZELLER et al., 2018). A Figura 9 mostram os estágios de maturidade classificados pelo modelo.



Figura 9: Estágios de Maturidade Digital do modelo ACATECH

Weber et al. (2017) propõem um modelo de avaliação de maturidade para manufatura orientada a dados construída a partir de uma análise para identificar características chave em três arquiteturas de informação para indústria 4.0, são elas: IIRA – Arquitetura de Referência para Internet Industrial, *RAMI* – Modelo de Arquitetura de Referência para Indústria 4.0 e SITAM – Arquitetura de TI Stuttgart para Manufatura.

Em termos práticos, as organizações ainda encontram problemas de implementação ao adotar os conceitos de indústria 4.0, isso se dá pelo fato de

que as soluções estão em um nível mais complexo e conceitual do que empírico e dependem de fatores que vão muito além de “*plug and play*” (ISSA et al., 2018).

Para isso, os roteiros tecnológicos (do inglês, *roadmaps*), como o nome alude, são uma poderosa ferramenta descritiva e visual que serve de mapa para que profissionais da área possam se guiar na jornada de aplicação de novas tecnologias de comunicação, automação e informação.

Ghobakhloo (2018) faz uma revisão do estado da arte de indústria 4.0 e suas tendências, além de propor uma visão holística dos passos a serem seguidos por indústrias que buscam se adequar ao cenário de transformação digital, passando pelos contextos de gerenciamento estratégico, *marketing*, *supply chain* e gestão de tecnologias e recursos de informação.

Outro exemplo de roteiro tecnológico é encontrado no *NAMUR's VDI/VDE Process Sensor 4.0 Roadmap*,⁹ que descreve sensores inteligentes conectados em rede como fundação para a arquitetura de processos em Indústria 4.0, o roteiro identifica os requisitos necessários para sensores inteligentes além de suas habilidades de comunicação e *context-awareness*.

Consideradas como palavras-chave em transformação digital, “flexibilidade” e “interoperabilidade” carregam características importantes para o contexto ao qual se refere no presente capítulo.

IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) define interoperabilidade como “a habilidade de dois ou mais sistemas ou componentes de trocar informação e reutilizá-la”. Já “flexibilidade” para o contexto, se trata da capacidade de uma solução tecnológica de se adaptar a sistemas modernos e atender a requerimentos futuros, estendendo seu ciclo de vida. (ver IEEE, 2019 e LOPEZ et al., 2020).

Burns et al. (2019) ressaltam a interoperabilidade entre ativos de uma empresa e a parte física dos sistemas como uma característica importante de sistemas de produção industrial no cenário de transformação digital. Nele, dispositivos

⁹ <https://www.namur.net/en/publications/news-archive/the-new-technology-roadmap-process-sensors-4-0-is-now-available.html>

inteligentes se tornam sensíveis ao contexto e são capazes de fornecer informação adicional para melhoria de desempenho. Além disso, os autores apresentam uma revisão sobre os padrões de interoperabilidade disponíveis para indústria 4.0, ressaltando a importância da conectividade entre os elementos presentes em sistemas de produção.

A evolução dos equipamentos de medição em processo acompanha o avanço tecnológico com o passar dos anos, conforme é ilustrado na Figura 10. Shultze et al. (2018) ressaltam a importância da disciplina de instrumentação e medição para o contexto de modernização e inovação, além de discutir potenciais e tendências.

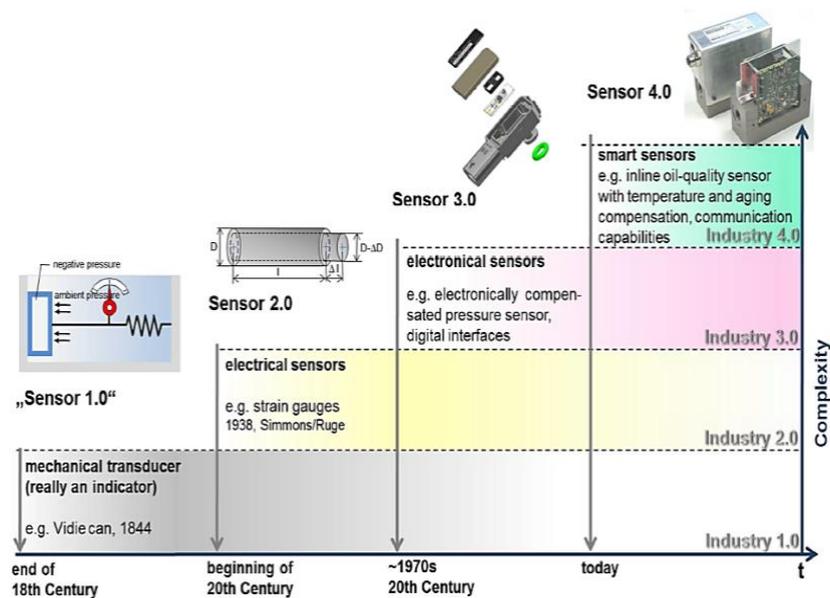


Figura 10: Evolução tecnológica dos equipamentos de medição em processos

Fonte: Shultze et al. (2018)

Eifert et al. (2020), discutem tendências para estrutura analítica de processos industriais, levando em consideração sistemas ciberfísicos, sensores inteligentes e técnicas de *Process Analytical Technology (PAT)*. Na Figura 11, é ilustrada a representação conceitual de sistemas com sensores inteligentes para *smart factories*, considerando elementos de informação de processos (em azul escuro) e inteligência de processo (em azul claro). Os elementos de informação alimentam a camada física enquanto a inteligência de processo é aplicada ao gêmeo digital. Cada um dos módulos contém elementos tecnológicos (destacados em laranja), onde o *smart sensor* é uma combinação entre os elementos do sistema ciberfísico

(linhas vermelhas), viabilizando aplicações industriais para PAT (camada superior).

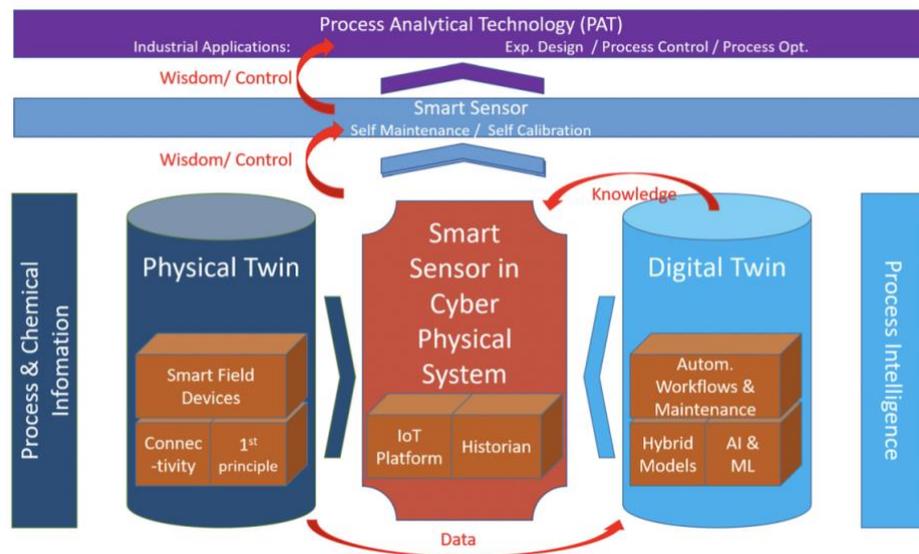


Figura 11: Representação conceitual de Sensores Inteligentes
Fonte: EIFERT et al. (2020)

A integração de métodos de *big data analytics* e ciência de dados para a análise de metadados em ambiente industrial é um aspecto inerente ao cenário de transformação digital e, para torná-lo factível a capacidade de adquirir e integrar grandes massas de dados além de estabelecer uma interconectividade entre os elementos de suas origens, deve ser considerada.

A Figura 12 mostra uma representação de *Industrial Wireless Network* proposta por Li et al. (2017) onde uma rede industrial sem fio pode ser aplicada em ambiente fabril através do uso de *smart entities*.

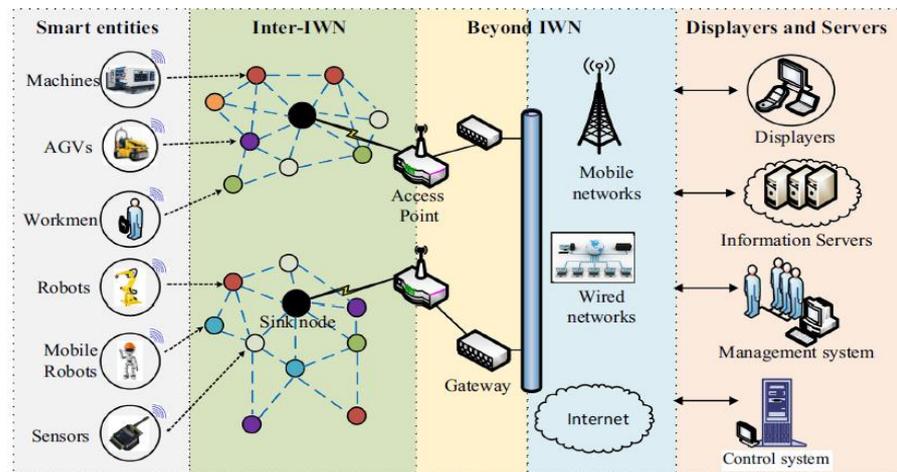


Figura 12: Esquematização de *Industrial Wireless Network (IWN)*
Fonte: adaptado de LI et al.(2016).

As soluções para aplicação de controle e automação em ambiente industrial tendem a ser oferecidas de maneira diversa, onde pacotes de softwares são disponibilizados seja em forma de “silos de informação”, com funcionalidades específicas para atender um determinado serviço, até soluções mais robustas, que oferecem interconectividade entre módulos operacionais. Sendo assim, para os setores de tecnologia de informação e automação a busca por padrões (*standards*), é, mais do que nunca, demasiada (Lepuschitz et al.,2015).

Uma descrição das principais normas utilizadas no contexto de tecnologia da informação em ambiente industrial é colocada a seguir:

- **ANSI/ISA-88:** Fornece diretrizes para controle de processos em batelada. Sua versão original foi proposta em 1997, com a denominação **IEC 61512**.
- **ANSI/ISA-95:** Padrão para integração de sistemas de controle corporativos, definindo a interface entre funções de controle e corporativas baseadas em um modelo hierárquico. A norma surgiu com o objetivo de reduzir custos e erros associados a integração entre tais funções além de garantir uma troca de informações de sistemas mais robusta, segura e econômica. Essa norma é identificada com **IEC 62264**.

- **ISO 15926:** Norma para sistemas e integração de automação industrial, considerando dados de ciclo de vida para plantas processos químicos. A ISO 15926-13:2018 determina uma ontologia para o planejamento de ativos, levando em consideração instalações de petróleo e gás, especificando um esquema XML (*extensible markup language*), para troca de dados a serem utilizados no planejamento de ativos.
- **IEC 62424:** Padrão para engenharia de controle de processos, considerando solicitações em diagramas de processo e instrumentação e troca de dados entre sistemas. A IEC 62424:2016 especifica a representação de solicitações entre uma ferramenta de engenharia de controle de processo e uma ferramenta P&ID através de uma linguagem de transferência de dados denominada CAEX (Computer Aided Engineering Exchange)¹⁰.
- **IEC 62714:** Norma para formato de intercâmbio de dados de engenharia em sistemas de automação industrial (AML - *Automation Markup Language*). A IEC 62714-1:2018 oferece uma solução para troca de dados baseada em XML, com foco no domínio de engenharia da automação. O formato de dados foi desenvolvido para suportar e viabilizar a troca de dados em um cenário heterogêneo de ferramentas de engenharia.
- **IEC 62541:** Padrão aberto baseado em arquitetura unificada OPC para definição de modelo de informação industrial *systems-to-machines* e *machine-to-machine*, combinando tecnologia da informação com tecnologia de operações. O OPC UA independe de fabricantes das aplicações consumidas, sistema operacional ou de linguagem de programação dos *softwares* utilizados, o que o torna um padrão escalável, podendo ser aplicado desde o nível físico, em controladores, até infraestrutura de nuvem com big data industrial.

¹⁰ Ver Drath, R. (2021). *AutomationML: The Industrial Cookbook*. De Gruyter.

- **ISO 42010:** Norma que aborda os aspectos de descrição arquitetural para sistemas de informação e engenharia de *software*, passando por aspectos que vão desde a sua concepção até a análise e sustentação.

Batchkova, Tzakova, Belev (2019) ainda citam a seguinte norma:

- **IEC 61499:** A norma define diferentes modelos de referência (sistema, dispositivo, recurso e aplicativo) apoiando o projeto de sistemas de controle distribuído em nível físico, níveis lógicos e conceituais e de diferentes pontos de vista. Estes modelos são baseados em três FB (Function Block): básico, compostos para encapsulamento de funcionalidades complexas, e interface de serviços de comunicação. Está relacionado como sucedâneo da IEC 61131 que trata de controladores programáveis com uma baseline para a linguagem de programação de PLC para aumentar a compatibilidade dos elementos de controle de processos.

Conforme é ressaltado por Sultanow e Chircu (2019), uma visão integrada de normas, tecnologias, ferramentas e arquiteturas de referência se mostra importante para que profissionais e estudantes que atuam no ramo de soluções em internet industrial das coisas (IIoT) possam entender as características, vantagens e limitações no cenário atual de aplicação de novas tecnologias.

Dentro desse panorama, os sistemas de automação deixam de ser estruturados apenas de forma que os dispositivos se comuniquem hierarquicamente, conforme é proposto pela norma ISA-95, e passam a fazer parte de uma rede colaborativa, interoperável e flexível.

Muñoz et al. (2010), propuseram uma infraestrutura para o gerenciamento de processos em batelada, baseado na ANSI/ISA 88 que se trata de um padrão para *batch process control*. No artigo, os autores mostram as vantagens da abordagem ontológica.

Para que a informação circule em um sistema industrial, é preciso que exista uma rede de comunicação industrial que faça o uso de protocolos de comunicação. OPC, originalmente denominado *OLE for Process Control*

(HANNELIUS et al., 2008), é uma tecnologia de informação para controle de processos amplamente usada em ambiente fabril.

Entre os anos de 2010 e 2012, a fim de tornar a integração entre os dados de processo mais fácil, a organização *OPC Foundation* propôs o *OPC Unified Architecture* (UA) através da norma IEC 62541, que mostra a maneira de implementar o novo protocolo e aborda seus conceitos e visão geral, conforme a Figura 13¹¹. (ver MAHNKE, LEITNER, DAMM, 2009). Tal tecnologia, surgiu como um promissor sucessor ao OPC DA (*Data Access*) e tem como objetivo trabalhar com uma plataforma de dados abertos, que diminua as lacunas entre as ferramentas de planejamento presentes em fábrica (SCHLEIPEN et al., 2014). Um exemplo de padrão para integração, compartilhamento, troca e entrega de dados entre sistemas computacionais, é a norma ISO 15926.

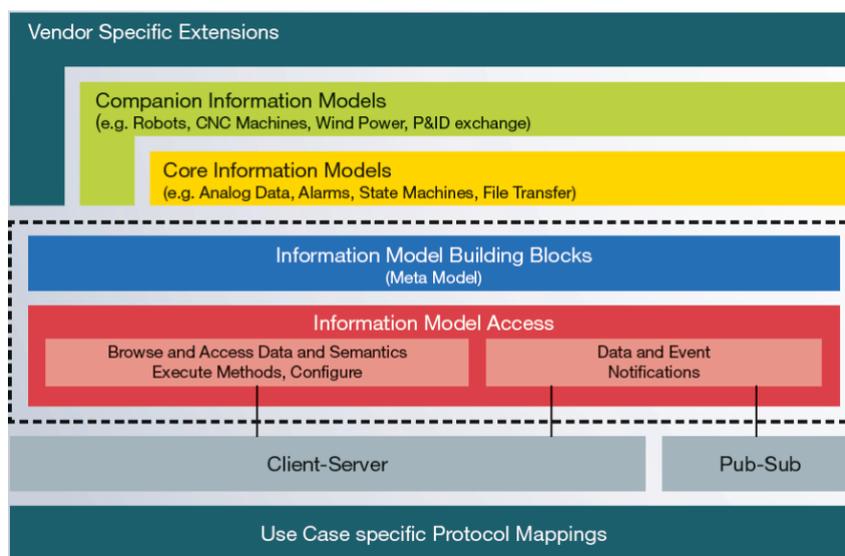


Figura 13: Estrutura para arquitetura de OPC UA .

Arquiteturas de referência têm o propósito de direcionar uma organização para o melhor uso de suas tecnologias e ferramentas, depois de devidamente testadas e aplicadas nos domínios de interesse. Diversas arquiteturas para o contexto de Indústria 4.0 são propostas na literatura, emergindo da parceria entre empresas de diferentes setores tecnológicos e instituições governamentais.

¹¹ <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>

A *Reference Architecture Model Industrie 4.0* (RAMI 4.0), foi criada pela associação alemã de manufatura de elétricos e eletrônicos, a ZVEI¹², em anuência com a iniciativa do país para inovar em seu desenvolvimento econômico. Sua estrutura considera três eixos de integração com a finalidade de aumentar as capacidades de comunicação e cooperação em sistemas ciber-físicos, são eles: Integração Horizontal (rede de construção de valor), Integração Vertical (sistemas de manufatura) e Integração de Ponta a Ponta, do inglês, *end to end* (acompanhamento de ciclo de vida do produto) (SCHWEICHHART et al., 2016). Sendo assim, todas as partes envolvidas nas atividades de uma *smart factory*, como serviços e ativos, por exemplo, têm uma estrutura comum para se comunicar interoperavelmente.

KIRMSE et al. (2019) propuseram uma arquitetura de quatro camadas baseada em conceitos da RAMI 4.0, onde agentes de software atuam através de um modelo para sistemas inteligentes, utilizando *big data* industrial, com o objetivo de disponibilizar dados para cientistas de dados através de uma camada de aplicação, oferecendo serviços de consulta de dados, análise exploratória e visualização dos resultados.

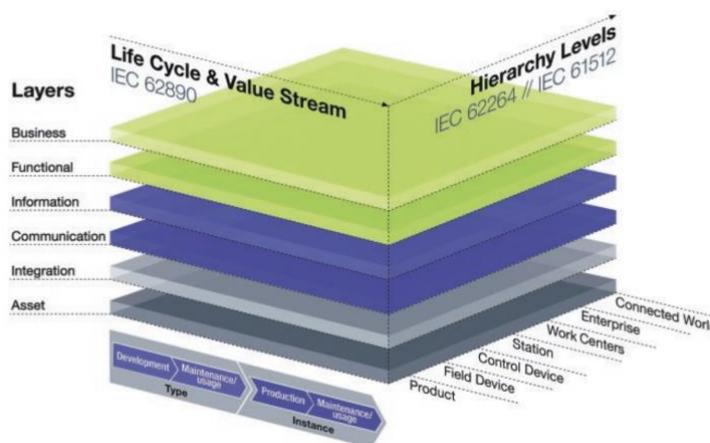


Figura 14: Modelo Arquitetural da RAMI 4.0

Fonte: (KIRMSE et al, 2019).

Acompanhando a tendência, outros modelos de arquitetura foram propostos por diversos institutos em outros países.

Nos Estados Unidos da América, o Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos da América (NIST), publicou o “*Standards Landscape for Smart Manufacturing Systems*”, do inglês, Cenário de Padrões para Sistemas Inteligentes de Manufatura (LU et al., 2016).

Na China, o *Standardization Administration of China* (SAC), publicou a “*National Smart Manufacturing Standards Architecture Construction Guidance*”, do inglês, Orientação de Construção de Arquitetura de Padrões Nacionais de Fabricação Inteligente (LI et al., 2016).

A *Industrial Internet Reference Architecture* (IIRA) foi publicada em 2015, pelo consórcio de Internet das Coisas Industrial, a proposta endereça a necessidade de uma arquitetura comum para desenvolver sistemas interoperáveis em IloT (internet industrial das coisas). A IIRA é baseada na estrutura de arquitetura IIAF (*Industrial Internet Architecture Framework*) que, por sua vez, é definida pela norma ISO 42010.

Sendo assim, a demanda pela execução de atividades mais robustas faz com que exista a necessidade de sistemas industriais mais integrados e seguros, abrindo espaço para as arquiteturas orientadas a serviço (*Service Oriented Architecture* - SOA) sejam aplicadas na transformação digital, onde as funcionalidades de um dispositivo podem ser oferecidas como um serviço para os outros componentes do sistema.

Leitão et al. (2016), mostram diferentes estratégias de inovação europeias para a aplicação de Arquiteturas Orientadas a Serviço, discutindo a definição e estrutura para design de sistemas ciber-físicos.

Um exemplo de SOA é a IMC-AESOP (**A**rchitectur**E** for **S**ervice **O**riented **P**rocess – **I**ntelligent **M**onitoring and **C**ontrol)¹³, uma arquitetura aplicável para o contexto de controle de processos e indústria 4.0. A Figura 15 faz um paralelo com controle tradicional e ciberfísico. No seu lado direito, pode-se observar que

¹³ <https://imc-aesop.org/>

as funcionalidades deixam de funcionar de maneira hierárquica e podem operar de maneira sincronizada, além de poder hospedar um gêmeo digital do(s) processo(s).

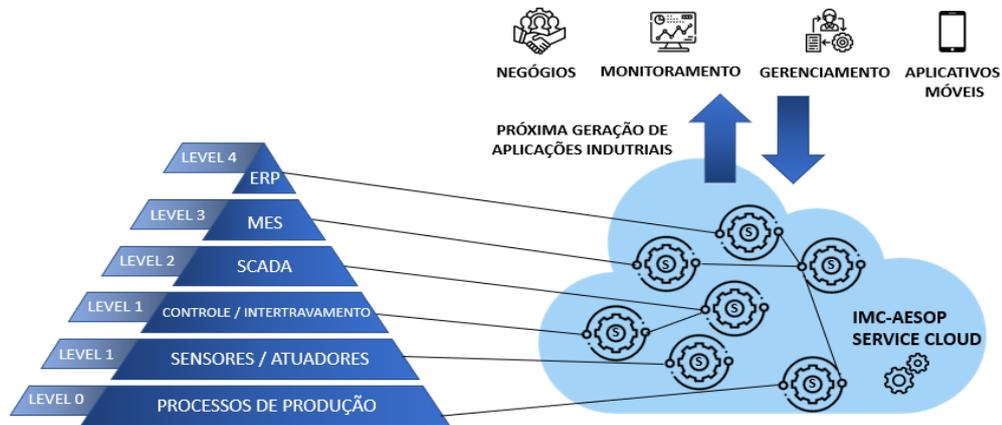


Figura 15: Migração do controle tradicional para ciberfísico
Fonte: LEITÃO et al.(2016).

Baheti e Gill (2011) discutem os desafios, oportunidades e necessidades de pesquisa e a importância da relação entre academia e indústria para o desenvolvimento de CPSs.

Abordagens de controle de processos voltadas para CPS possibilitam, através das arquiteturas de comunicação propostas para esse tipo de sistema, um aumento da flexibilidade e interoperabilidade nos sistemas, um exemplo, é o trabalho de Sanchez et al. (2016) que publicaram pesquisas voltadas para sistemas ciber-físicos. No artigo, foi desenvolvida uma SOA, visando a melhoria da troca de informações no contexto de controle de processos e indústria 4.0. Além disso, os autores mostram 10 arquiteturas de referência relevantes para a área de sistemas ciber-físicos e se baseiam na proposta do *National Institute of Standards and Technology* (NIST) para a proposta do artigo.

Os detalhes funcionais da estrutura de arquitetura sistêmica proposta pelos autores, baseada na *NIST CPS Architecture*, é ilustrada na Figura 16.

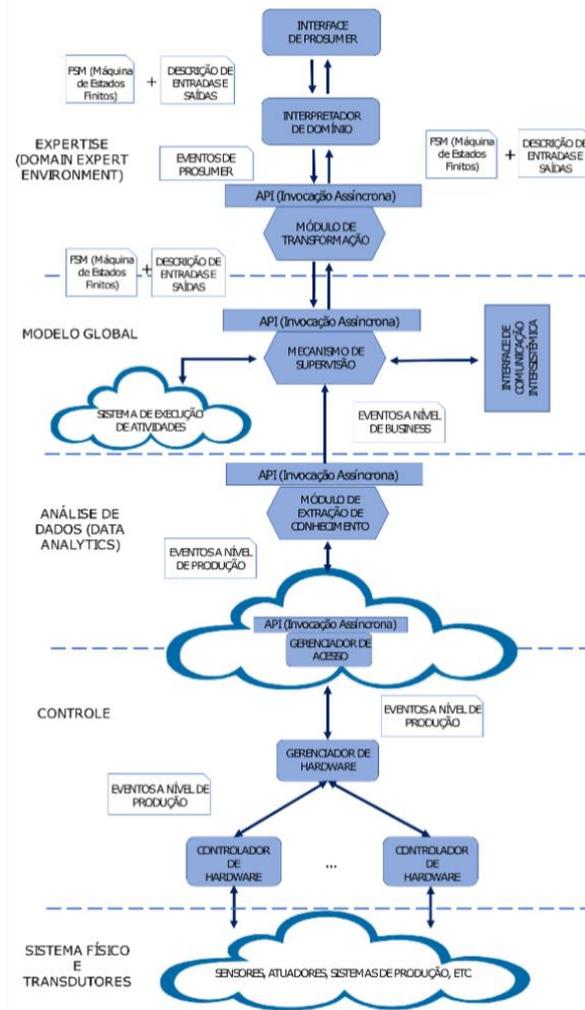


Figura 16: Detalhe de uma arquitetura funcional para um CPS

Fonte: SANCHEZ et al. (2016).

Ainda na Figura 16, percebe-se que os dados que circulam através da arquitetura de comunicação (*Big Data*) estão sendo trabalhados de forma simultânea e estão disponíveis para o funcionamento da automação.

O conceito *Modular Type Package*, proposto pelas instituições alemãs NAMUR, ZVEI, VDI, VDMA, e ProcessNet, (BERNSHAUSEN et al., 2016 e HOLM et al., 2016) serve como um habilitador da flexibilidade para automação de processos industriais, onde a estrutura dos sistemas modulares descritos é, de diversas formas, uma reformulação da ISA-88 e ISA-95, com automação usando tecnologias embarcadas e modelos *plug and produce*, que funcionam independentemente de fornecedores. Os dados gerados na engenharia de um módulo são fornecidos pelo fabricante através de um arquivo XML.

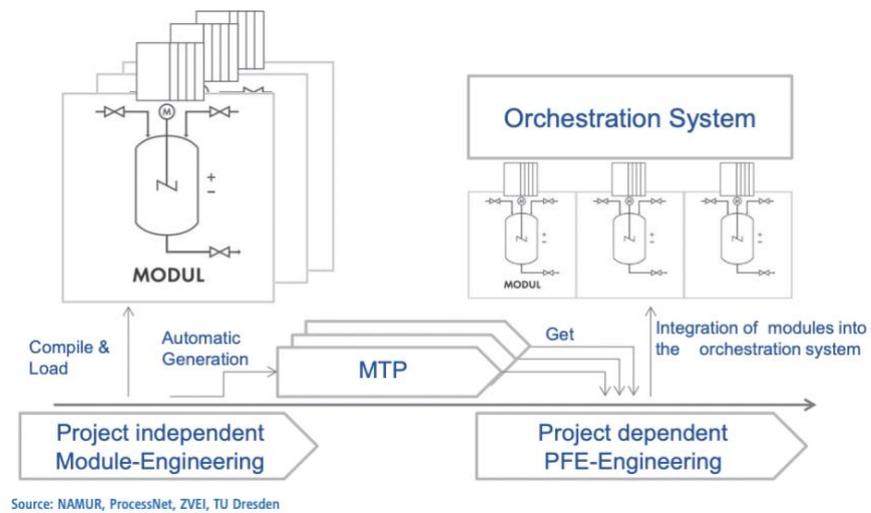


Figura 17: Troca de informações entre processos utilizando Modular Type Package¹⁴.

3.3 Ontologias e Indústria 4.0

Nesta sessão, encontra-se um guia para centralizar informações. Desta vez, para o uso da camada semântica em sistemas industriais através de ontologias, visando a analisar os padrões existentes e as vertentes para cenários futuros. Nele, é realizada uma contextualização do que é a integração da camada semântica através de ontologias e uma descrição detalhada do estado da arte e de seu potencial de uso em Indústria 4.0, tanto para processos em batelada quanto para contínuos.

O termo “ontologia” tem ampla aplicação e é conceituado nas áreas de conhecimento de humanidades, sendo absorvido como um termo técnico na área de *Web Semantic* e *Structured Natural Language* (SNL) onde é cada vez mais difundido em áreas de sistemas computacionais, extração de dados em *databases* e busca de informações em medicina, engenharia e administração de negócios, por exemplo, cada uma delas com sua nova conceituação e peculiaridades.

Pickler (2007) define semântica como tudo aquilo que se refere as palavras como um sinal de comunicação, fazendo uma conexão da linguagem com a realidade.

De acordo com o dicionário Oxford, semântica é o ramo da linguística e lógica com relação ao significado das coisas. A área se subdivide em semântica formal, onde o foco se dá no estudo dos aspectos lógicos do significado e semântica lexical, voltada para a análise dos significados das palavras e suas relações.

Ontologias são um caminho para o compartilhamento de informações entre diferentes sistemas, definindo a representação de entidades em um determinado domínio. Através delas, é possível habilitar o reuso de informações e separar o conhecimento de seu domínio operacional, passando analisar o domínio de estudo, ou seja, considerando abstrações.

Considerando que *hardwares* e *softwares* estão em constante evolução e são atualizados constantemente e que a linguagem natural (naturalmente desenvolvida pelos seres humanos) muda relativamente devagar, o uso de ontologias se faz vantajoso para a integração de diferentes bases de dados.

Sendo assim, para o presente trabalho, a aplicação do termo se refere a uma conceituação formal de representação do conhecimento, viabilizando a realização de definições dos conceitos e relações entre os elementos presentes nos sistemas simulados e capturando o domínio do conhecimento na interoperabilidade.

Noy e McGuinness (2000) listam algumas das razões para se desenvolver uma ontologia, são elas:

- Compartilhar, entre pessoas e agentes de software, o entendimento comum de uma estrutura de informação;
- Habilitar o reuso de conhecimento sobre um determinado domínio
- Tornar suposições de domínio explícitas;
- Separar conhecimento de domínio de conhecimento operacional;
- Analisar o conhecimento do domínio.

Ainda no trabalho proposto pelas autoras, é proposto um guia para iniciantes no *design* de ontologias. Onde é colocado que, ao definir classes, subclasses e a hierarquia taxonômica de uma ontologia, três abordagens são comumente utilizadas e sua adoção depende da escolha do *designer*, considerando seu conhecimento sob o domínio, são elas: *Top-down*, quando o raciocínio de construção vai dos conceitos mais generalizados até suas especificações; *Bottom-up*, uma abordagem inversa a explicada anteriormente, indo de conceitos mais específicos até os mais gerais e “combinação”, onde se destacam os conceitos e se generaliza ou especifica, conforme a sua natureza.

Embora existam boas práticas no design de ontologias, não há uma metodologia explicitamente melhor do que outra. Engenhar uma ontologia é um processo iterativo que passa por etapas que vão desde a sua idealização, definição de escopo, estabelecimento de classes, subclasses, propriedades e suas restrições até a definição de instâncias. Durante o processo, o designer deve testar a ontologia em seu domínio de aplicação e fazer ajustes necessários até que a consistência da ontologia seja validada.

De maneira geral, existem duas formas de representar ontologias, sendo elas: formal (com enfoque no seu uso por computadores) e gráfica (para compreensão humana).

Quando se trata de representação formal, as seguintes linguagens são as mais utilizadas: RDF (*Resource Description Framework*), RDF-S (*Resource Description Framework – Schema*) e OWL (*Web Ontology Language*), detalhes e conceituações são encontrados em Jacob (2003) e Antoniou et al. (2004).

Já para representações gráficas são utilizados grafos, estrutura de árvores e *Unified Modelling Language* (UML). Kogut et al. (2002), explica conceitos e vantagens do uso de UML.

Dessa maneira, podemos dividir as ontologias em duas grandes classificações: leves ou pesadas e como sendo “de domínio” ou “de tarefa” (ISOTANI e BITTENCOURT, 2015). As ontologias leves são aquelas onde a taxonomia e relação hierárquica entre os conceitos são definidas sem muitas preocupações em detalhar cada conceito apresentado. Do contrário, o enfoque das ontologias pesadas se dá na representação rigorosa da semântica entre cada uma das definições de conceito, o que é considerado fundamental para criar bases de conhecimento que facilitem a interoperabilidade e fusão de informações.

De acordo com Campos (2010), ontologias de domínio têm seu vocabulário associado a um domínio genérico (exemplo: medicina ou automóvel), representando o conhecimento sobre um tópico, ou seja, caracterizando e definindo o domínio ao qual as tarefas ocorrem. Já as ontologias de tarefa (exemplo: diagnóstico ou venda) são voltadas para a representação da aplicação do conhecimento para resolver problemas em diferentes situações.

As aplicações de ontologia dedicada a semântica formal de informações dentro da Engenharia Química são voltadas para projetos de unidades industriais, simulação de fluxogramas e análise de segurança (BATRES, 2017). Com o advento da Indústria 4.0, o interesse em usar ontologia para a automação de processos em batelada emerge naturalmente, para que seja integrada ao SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) (LEPUSCHITZ et al., 2018).

Para a caracterização de fábricas inteligentes, o enfoque se dá em como lidar com a tripla *descrição-conhecimento-interpretação* para a representação do conhecimento dos dados que estão sendo trabalhados, onde o vocabulário escolhido deve representar um conceito. Para isso, são utilizados mecanismos e linguagens de representação no domínio.

Portanto, mais do que classificar e acessar etiquetas classificadoras (*labels*) como é feito em computação de dados, ou protocolos de chamada de tarefas como em robótica, o trabalho de dissertação visa a representação de grupos de funções de modo que a característica de “*smart factory*” da indústria 4.0 seja realmente um sistema integrado ciberfísico (e não uma simples expansão das atividades e tecnologias tradicionais). Felizmente, existem vários casos de aplicação de ontologia em diversas atividades tecnológicas (KUMAR et al., 2019), que serviram como base para a revisão mestre do estado da arte.

A construção da ontologia deve seguir os seguintes passos (WANG et al., 2020):

- Determinar o domínio e escopo da ontologia;
- Considerar o reuso das ontologias existentes;
- Enumerar os termos importantes (*core classes*);
- Definir as classes e suas hierarquias;
- Definir as propriedades das classes (*slots ou roles*) e suas restrições (*facets*);
- Criar instâncias, ou seja, grupos de propriedades que indicam o objeto de monitoramento.

Nesse tipo de estrutura, a criação de regras de acesso (*reasoning rules*) é o que vai definir as possibilidades de interoperabilidade, modularidade, processamento distribuído e integração em tempo real. Diferente das ontologias computacionais que buscam funções de processamento e de acesso a circuitos, a ontologia de processos busca utilizar os acessos a informações para diferentes funções, tais como monitoramento da qualidade de produtos, de segurança do processo, de supervisão e controle de processos, diagnóstico de falhas, alocação de tarefas, entre outros. Se possível, com reuso das informações não apenas do processo, mas diferentes cálculos realizados para controle, otimização, *machine*

learning etc. É necessário lembrar que tanto o lado físico quanto o lado virtual de CPS têm suas lógicas de controle e de decisão para tomada de ações, porém com objetos diferentes em funções diferentes, que devem ser integrados para que o sistema se torne, de fato, ciberfísico.

Engel et al. (2018), apresentam um exemplo de produção de mistura de líquidos em batelada. Ainda no trabalho, há uma boa discussão baseada em ontologia sobre sistemas de produção integrados em ciberfísico, que será início da elaboração da ontologia de controle de processos industriais contínuos para o presente trabalho.

Dentro do contexto de engenharia de processos, em inglês, *Process System Engineering* (PSE), ontologias passam a fazer sentido para o cenário de indústria 4.0 dado o avanço da digitalização, volume e variedade de dados e das tendências que levam a uma nova era de tecnologias de comunicação, operação e informação em processos químicos, além da necessidade de combinar alta eficiência de produção, baixos custos e alta flexibilidade tecnológica, conforme explicitado no item 3.2 do presente trabalho.

Kumar et al. (2019) ressaltam a importância do uso de ontologias para transformação digital a fim de viabilizar a interoperabilidade entre sistemas, utilizando representações formais dos conceitos de indústria 4.0. No trabalho, os autores descrevem algumas ontologias propostas para o cenário, fortemente direcionado para robótica: CORA (*Core Ontology for Robotics and Automation*) baseado em IEEE 1872-2015 (*Standard Ontologies for Robotics and Automation*), ROA (*Ontology for Autonomous Robotics*) para robôs autônomos com definição de comportamento, função, objetivo e tarefas, ORArch (*Ontology for Robotic Architecture*) que elabora noções relacionados a *hardware* e *software*, além de conceitos das ontologias anteriores, e O4I4 (*Ontology for Industry 4.0*) dedicado a I4.0 reusando as outras ontologias anteriores.

Natarajan et al. (2012), propuseram uma ontologia para supervisão distribuída de processos em larga escala e discutiram exemplos, baseados na OntoCAPE (*Ontology for Computer Aided process Engineering*). OntoCAPE está detalhado em MARQUARDT et al. (2010).

Batres (2017) revisa ontologias no contexto de engenharia de processos, em que mostra o uso de ontologias para diversas finalidades, incluindo ontologias multipropósito, tais como OntoCAPE e ISO 15926, além de metodologias para um bom projeto de ontologia.

O presente trabalho vai além de mostrar exemplos e funcionalidades de integração ciberfísica em processos industriais. Trata-se de possibilitar a aplicação de indústria 4.0 em ambiente industrial através do uso de conceitos e experimentos, com aprendizagem dos obstáculos para sua implementação, onde tais dificuldades são mais conceituais do que aquelas presentes nos padrões e normas da programação que se fazem necessárias para integração de CPSs, dada a natureza das ferramentas utilizadas para tal aplicação.

Portanto, a abordagem abre caminho para o uso final de CPS: a “inteligencialização” de um sistema integrado de produção, que, apesar de não ser contemplado na dissertação, é objeto para trabalhos futuros e surge com mais força nos sistemas de processamento industrial químico. No apêndice B, pode-se encontrar um caso de uso para integração ciberfísica em um sistema de reator batelada simulado e o passo a passo de integração entre os seguintes softwares: Aspen Dynamics, Matrikon OPC, OSIsoft (PI system) e Matlab.

O que se prega no presente estudo, é de que o assunto não se trata apenas de *smart production*, *smart factory* ou *smart industry* e que se deve evoluir para uma fábrica que aprende, ou seja, uma fábrica inteligente. Portanto, é necessário avançar um passo de cada vez, revendo os aspectos práticos e conceituais de CPS voltado ao processamento químico.

Uma reflexão da nova era do setor de óleo e gás pode ser vista em Lu et al. (2019).

Wang et al. (2020), testaram a usabilidade de uma modelagem baseada na metodologia OPO (*Observational Process Ontology*) e regras de raciocínio a fim de monitorar a qualidade da água do rio Qingyi na China, além de rastrear agentes de poluição. As Figuras 18 e 19, descrevem a ontologia proposta pelos autores onde é representado o uso combinado de DOLCE (*Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering*) Ultra-Light (DUL) e OPO e são

caracterizadas as propriedades de subclasses, seus identificadores temporais e de local, seus classificadores e restrições específicas que permitam acesso por regras semânticas.

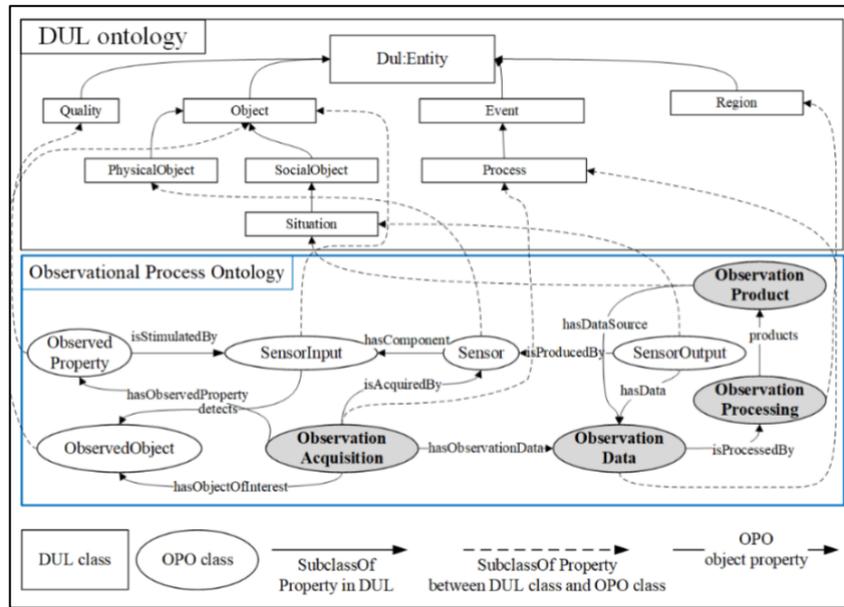


Figura 18: Exemplo de representação de uso de OPO combinado com uma ontologia de nível superior (DUL *Ontology*).

Fonte: WANG et al.(2020).

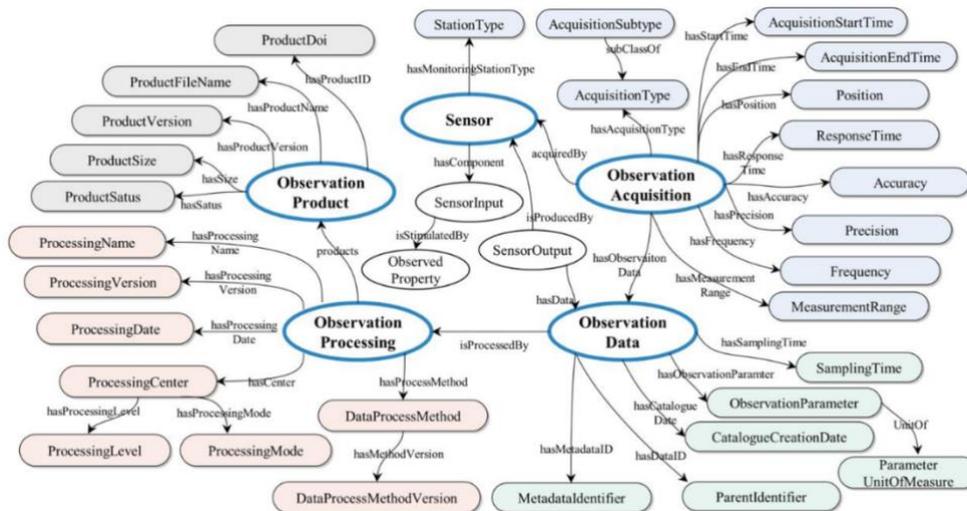


Figura 19: Exemplo de descrição e classificação de *core classes*

Fonte: WANG et al.(2020).

Um outro exemplo de arquitetura conceitual é encontrado em Schneider et al. (2019). Os autores apresentaram uma nova abordagem para a integração de CPASs (CPSs aplicados em sistemas de automação) através do método intitulado *Virtual Engineering* (VE). No trabalho, a lógica de controle de um processo em batelada foi utilizada como caso de estudo. A Figura 20 mostra a arquitetura para integração da metodologia utilizada pelos autores.

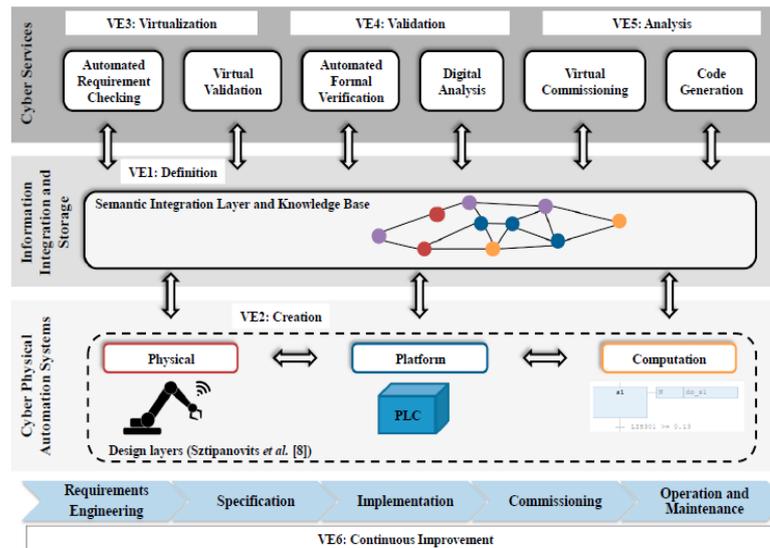


Figura 20: Exemplo de representação da integração entre a metodologia de VE com uma arquitetura conceitual

Fonte: SCHNEIDER et al. (2019)

4 DESCRIÇÃO DO CASO DE USO

O presente capítulo descreve o caso de uso utilizado como objeto de estudo para a dissertação. Nele, é descrito em detalhes um esquema clássico de controle de reator batelada.

4.1 Sistema Clássico para Controle de Reator Batelada

O reator do tipo batelada proposto por Zoss (1979), é um equipamento encamisado e seu respectivo diagrama de processo e instrumentação é descrito conforme a Figura 21, a seguir.

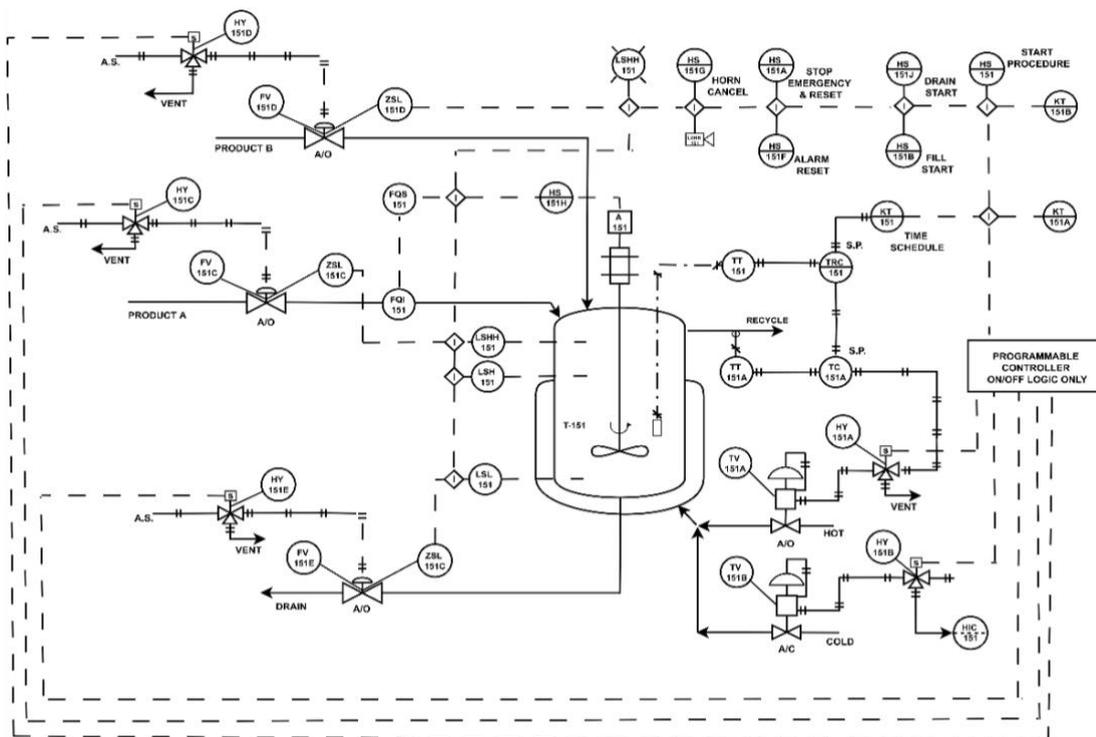


Figura 21: P&ID do sistema para controle de um reator batelada

Fonte: ZOSS (1979).

Na Tabela 1, encontra-se um detalhamento da instrumentação do sistema.

Tabela 1: Detalhamento da Instrumentação (Zoss, 1979).

ETIQUETA DE MONITORAMENTO	DESCRIÇÃO
HS-151	Botão manual para iniciar operação
KT-151	Contador de tempo para geração de <i>setpoint</i> para o TRC-151
TRC-151	Controlador e registrador de temperatura
TT-151	Transmissor de temperatura
T-151	Reator
A-151	Agitador
LSL-151	Sensor de nível baixo
LSH-151	Sensor de nível alto
LSHH-151	Sensor de nível muito alto
HIC-151	Estação para controle e indicação de carga manual de água gelada
FQI-151	Indicador de quantidade de fluxo para o enchimento de A
FQS-151	Contador de quantidade de fluxo para o enchimento de A
TC-151A	Controlador de temperatura para válvula de vapor
HY-151A	Solenóide para entrada de vapor
TV-151A	Válvula para entrada de vapor
TT-151A	Transmissor de temperatura de vapor
KT-151A	Contador de tempo para manter a temperatura em 50°C
HS-151A	Botão manual para acionamento do enchimento do reator
HY-151B	Solenóide para entrada de água fria
TV-151B	Válvula para entrada de água fria
KT-151B	Contador de tempo para manter a temperatura em 80°C
HS-151B	Botão manual para pausa emergencial e reset
HS-151C	Botão para acionamento manual de enchimento de A
HY-151C	Solenóide para enchimento de A
FV-151C	Válvula para enchimento de A
ZSL-151C	Posicionador da válvula solenóide para enchimento de A
HS-151D	Botão para acionamento manual de enchimento de B
HY-151D	Solenóide para enchimento de B
FV-151D	Válvula para enchimento de B
ZSL-151D	Posicionador da válvula solenóide para enchimento de B
HS-151E	Botão para acionamento manual de dreno de produto de reação
HY-151E	Solenóide para dreno de produto de reação
FV-151E	Válvula para dreno de produto de reação
ZSL-151E	Posicionador da válvula solenóide para dreno de produto da reação
HS-151F	Botão manual para reset de alarme
HS-151G	Botão manual para cancelamento de alarme sonoro de nível alto
HS-151H	Botão para operação manual do agitador
HS-151J	Botão manual para acionamento de dreno de produto desejado

Ainda na Figura 21, pode ser observada a consideração de alarmes de segurança para no caso de algumas situações de risco, como nível muito alto do conteúdo dentro do reator.

Tipicamente, para o controle de sistemas em batelada, é programada uma sequência de operações, que inclui operações booleanas (*on/off*), assegurando que o ciclo será cumprido na ordem correta. Ou seja, em cada uma das etapas, há a abertura (0 ou *off*) ou fechamento (1 ou *on*) de diferentes circuitos para que um determinado objetivo seja atingido.

O perfil de controle desta variável é amplamente estudado e segue o comportamento descrito na Figura 22, a seguir.

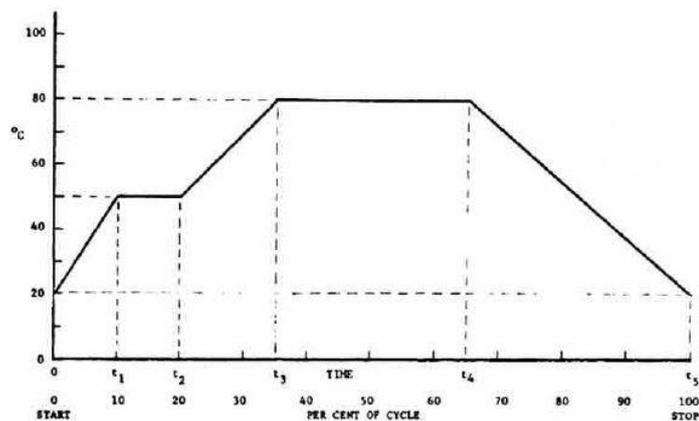


Figura 22: Perfil de controle de temperatura para reator batelada
Fonte: ZOISS (1979)

Ainda no esquema representado pela Figura 22, cinco passos principais descritos como “Controle Procedural” em Zoss (1979), são eles:

i. Apertar Botão Iniciar HS-151

Colocar o botão HS-151 na posição *on* (fechada), aciona três operações subsequentes.

A primeira ação se dá nas condições de desligamento do sistema ou carregamento de reagentes no reator, as válvulas de controle TV-151A e TV-151B devem estar fechadas, impedindo a entrada de vapor ou água

gelada na camisa do reator. A segunda ação ocorre com o início do ciclo, onde as válvulas devem responder conforme a atuação do controlador TC-151A e a ação de controle se dá através das válvulas solenoides HY-151A e HY-151B.

Para assegurar que a temperatura esteja nos valores desejados de *setpoint*, o sistema contém duas válvulas solenoides: uma normalmente fechada, para entrada de vapor (TV-151A) e outra normalmente aberta, para a entrada de água gelada (TV-151B). Através delas, é realizado o controle do tipo *split-ranged*, onde a válvula para a refrigeração é normalmente aberta devido a questões de segurança em caso de falha no acionamento.

Além disso, o controle de temperatura da camisa do reator é feito de maneira que, durante a fase de aquecimento, a válvula de vapor esteja aberta e a de água gelada esteja fechada. Ou seja, a TV-151B estará aberta de 3 psig até 9.2 psig. A partir de 8.8 psig de pressão a TV-151A é acionada e o vapor começa a ser enviado para a camisa, estando completamente aberta em 15 psig.

Quando HY-151B está desligada, a estação de carga manual de água gelada, HIC-151 é conectada ao atuador da válvula TV-151B.

Por fim, o contador de tempo KT-151 também é acionado pelo botão HS-151. Neste passo, KT-151 tem a função de gerar um sinal pneumático para o *setpoint* de temperatura de 20°C para 50°C, que, por sua vez, é recebido por TRC-151. Quando a temperatura de processo atinge 50°C, o passo 2 é ativado. A sequência de ações tem duração equivalente a 10% do ciclo total.

ii. Iniciar contador de tempo KT-151A

Com a variável temperatura em 50°C e KT-151 desligado, o Controlador Programável (com apenas lógica on/off) envia um sinal para a ativação de KT-151A, que, por sua vez, mantém a temperatura em 50°C até 20% do tempo do ciclo total da batelada.

iii. Reiniciar contador de tempo KT-151

Neste passo, KT-151 é reiniciado e o *setpoint* de temperatura é novamente elevado, desta vez, para 80°C, consumindo mais 15% do tempo total do ciclo. Quando o *setpoint* é alcançado, KT-151 é desligado e KT-151B é acionado.

iv. Iniciar contador de tempo KT-151B

O procedimento do passo 4 é similar ao encontrado no passo 2, nele, o *setpoint* de temperatura é mantido em 80°C até que o sejam atingidos 65% do ciclo total em termos de tempo, então, KT-151 é novamente acionado.

v. Reiniciar contador de tempo KT-151

Por fim, o *setpoint* em TRC-151 vai de 80°C para 20 °C, para refrigeração do produto desejado, obtido com a reação. Quando a temperatura 20 °C é alcançada, HS-151, HY-151A e HY-151B vão para a posição de desligados. Esta ação marca o fim do ciclo, tornando o sistema pronto para uma nova sequência de operação em batelada.

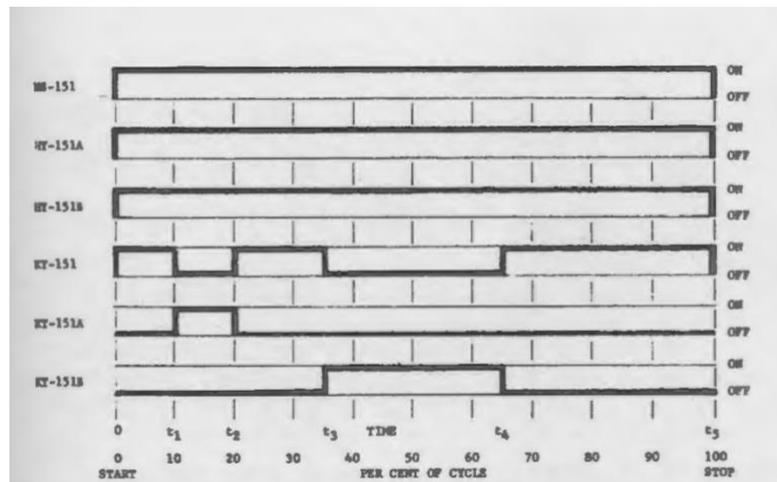


Figura 23: Diagrama de Ciclo de tempo para Controle Procedural de

Fonte: Zoss (1979)

O ciclo de batelada segue a seguinte sequência lógica, também chamada de camada de controle sequencial e representada pelos diagramas em *Ladder*:

1. Enchimento do reagente A (até x galões)

2. Enchimento do reagente B (até atingir o limite de nível superior)
3. Ativar a agitação (acionamento de motor)
4. Ativar o esquema para controle de temperatura (procedural)
5. Parar a agitação (ao fim do controle procedural)
6. Drenar o produto (até atingir o limite de nível inferior)
7. Reposicionar os componentes para o início de um novo ciclo

A carga do reagente A é realizada mediante a uma quantidade pré-determinada do componente. A operação é realizada com a condição (*interlock*) de que a válvula de dreno do reator esteja fechada. No fim do ciclo, a descarga do produto é realizada através da válvula FV-151E e uma nova batelada pode ser iniciada.

Na Figura 24 é demonstrada a programação em *Ladder* feita por Zoss (1979), onde o lado “a” é a parte referente ao sistema de alarmes de nível alto, enchimento do vaso além do acionamento e alarme para caso de falha no agitador. O lado “b” da mesma figura, se refere ao controle procedural.

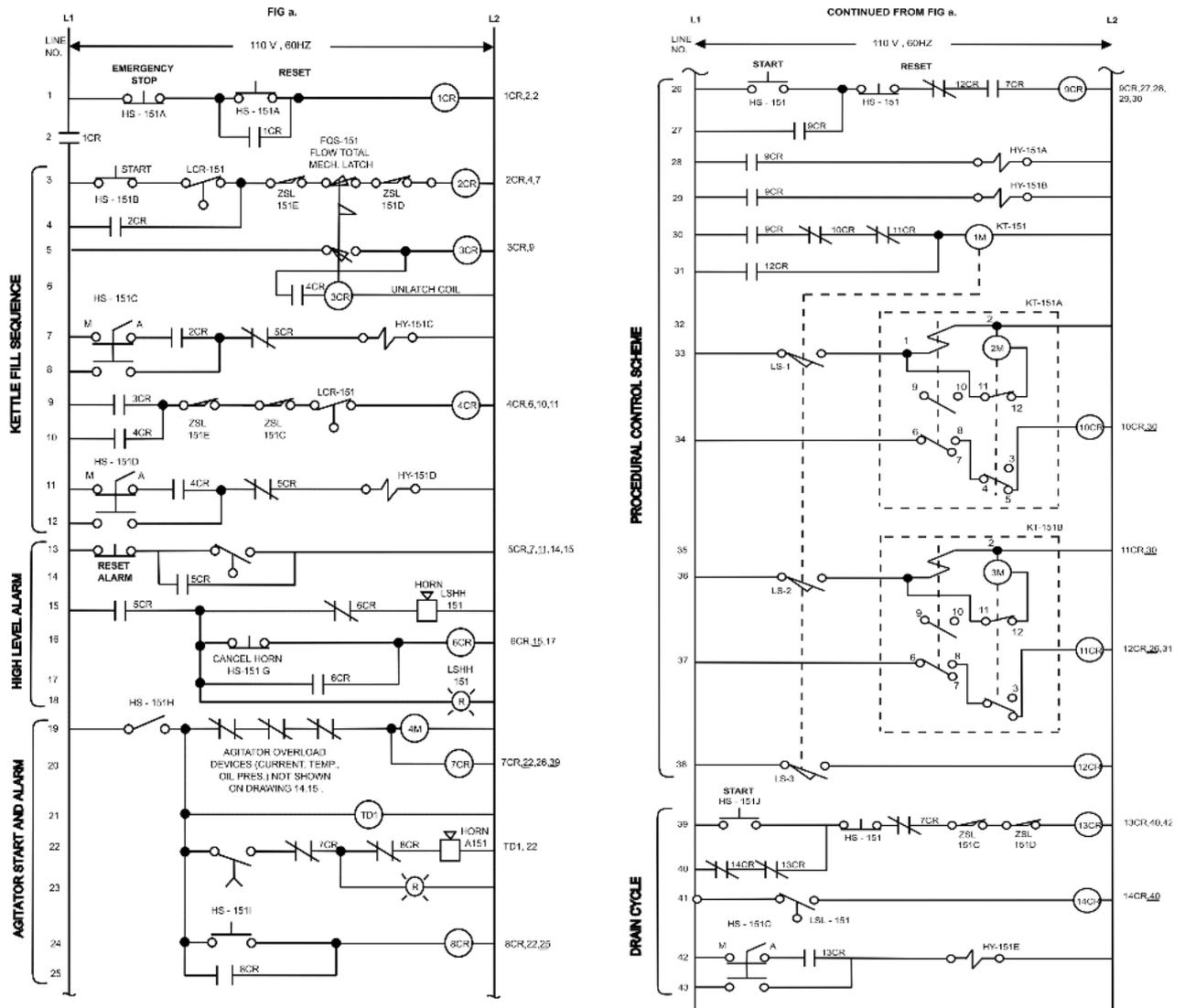


Figura 24: Diagramas em Ladder para controle do reator batelada

Fonte: ZOSS (1979).

5 CONTROLE DE PROCESSOS EM BATELADA PARA I4.0

Neste capítulo, é discutida uma abordagem para o controle de processos em batelada no cenário de transformação digital, demonstrando a aplicação de ontologias para um esquema clássico de controle de variáveis em reator batelada, passando pelo desenvolvimento de um algoritmo de orquestragem para integração dos dados na camada semântica.

Conforme já descrito no Capítulo anterior, OWL (*Web Ontology Language*) surgiu como uma representação madura da linguagem da representação do conhecimento para a Web. Baseado em XML e em RDF, OWL pode ser usado para fornecer definição semântica para descrever qualquer recurso em qualquer lugar da Web, com o potencial para realmente criar repositórios distribuídos de conhecimento interpretáveis pela máquina. Vários níveis diferentes de semântica são suportados. Em particular, o subconjunto OWL-DL implementa o formalismo da descrição, desenvolvido para descrever os elementos e suas relações semânticas, para representar o conhecimento de um domínio de aplicação definindo primeiro os conceitos relevantes do domínio (sua terminologia), e então usando esses conceitos para especificar propriedades de objetos e indivíduos que tem ocorrência neste domínio (a descrição do domínio) (LASTRA e DELAMER, 2006).

Nele, os módulos e camadas de abstração da OntoCAPE (*Ontology for Chemical Process Engineering*) são aproveitados na aplicação para o domínio apresentado por Zoss (1979). Além disso, a representação do controle de processos é feita através da abordagem de “*Controle como um Serviço*”.

5.1 Representação do domínio de estudo

Conforme mencionado anteriormente, não há metodologia considerada ideal ou um padrão para o desenvolvimento de ontologias, o *design* depende de fatores que vão desde o conhecimento do *designer* sobre o domínio de estudo até a maturidade dos conceitos relacionados ao mesmo. Entretanto, algumas boas práticas são consideradas o *design*, dentre elas, está a escolha de uma ontologia consolidada no

domínio de engenharia de sistemas e processos químicos, com definições estabelecidas e colaborações ao longo dos anos: a OntoCAPE.

A OntoCAPE (*Ontology for Computer Aided Process Engineering*) captura o conhecimento no domínio de engenharia de processos, para que este seja utilizado e compartilhado entre pessoas e sistemas no contexto de CAPE, suportando desde modelagem matemática até gestão do conhecimento e integração de dados. Sua estrutura é baseada em três elementos e descrita por MORBACH et al., (2008), conforme apresentado a seguir:

1. **Camadas (*layers*):** se subdivide em cinco níveis de abstração, onde é realizada uma dissociação do conhecimento geral do conhecimento de aplicações e domínios específicos. A *meta layer* é a camada mais abstrata, que apresenta conceitos fundamentais de modelagem e diretrizes do projeto para a construção da ontologia, além de seu metamodelo. A *upper layer* define os princípios de funcionamento teórico dos sistemas. Na *conceptual layer* é construído um modelo conceitual do domínio, nela, são descritas operações unitárias, modelagem e simulação de processos e suas propriedades termodinâmicas, por exemplo. Na sequência, as duas camadas inferiores refinam o modelo conceitual e apresentam as classes e respectivas relações necessárias para a aplicação prática da ontologia, enquanto a *Application Oriented Layer* se estende a áreas de aplicação genéricas, a *Application Specific Layer* fornece classes e relações para aplicações estabelecidas.
2. **Módulos (*modules*):** um módulo agrupa classes, relações e axiomas inter-relacionados que, juntos, formam um tópico específico. Um exemplo é o módulo '*plant*', que fornece uma conceituação para "*chemical plants*".
3. **Modelos Parciais (*partial models*):** módulos que abordam tópicos intimamente relacionados, um exemplo pode ser encontrado no modelo parcial '*plant_equipment*', que agrupa os módulos relacionados tematicamente '*fixture*', '*apparatus*' e '*machine*'.

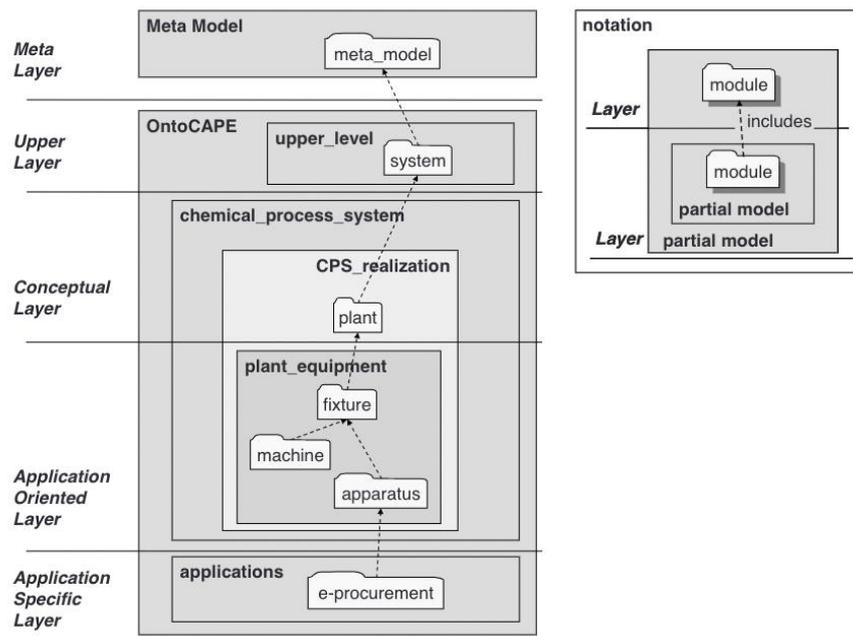


Figura 25: Detalhe de Metamodelo para OntoCAPE

Fonte: MORBACH et al.(2008)

Considerando que o domínio de estudo se trata de um reator químico que opera em batelada proposto por Zoss (1979), descrito no capítulo anterior, o modelo parcial escolhido para a aplicação é o **chemical_process_system** que, por sua vez, tem sete módulos parciais inclusos, além de considerar dois módulos parciais de outros modelos. Destes, são aproveitados para a aplicação os módulos a seguir:

- **cps_function:** reflete o comportamento desejado de operação do sistema. Sendo assim, classifica procedimentos físicos, químicos e biológicos além de levar em consideração os conceitos relacionados ao processamento de informação para automação dos processos.
- **cps_realization:** representa a parte física de sistemas de processo químico, considerando controle e observação de variáveis através de tecnologias e equipamentos.
- **process_units:** faz referência as operações unitárias do processo químico, considerando seus diferentes aspectos funcionais, que podem

ser refletidos em *function*, *realization*, *behavior* e *performance*. A OntoCAPE considera, até o presente momento, seis operações unitárias: *mixing unit*, *splitting unit*, *flash unit*, *chemical reactor*, *heat transfer unit* e *distillation system*.

- ***process_control_equipment***: fornece uma descrição conceitual específica para equipamentos de equipamentos de medição e controle utilizados em sistemas de processo químico, o módulo também aplicado na camada de abstração *application-Oriented Layer*, é uma especialização de ***cps_realization***.
- ***material***: representa a abstração do conceito de matéria, tudo aquilo que tem massa e ocupa lugar no espaço. O modelo parcial considera as características da matéria que independem de tamanho, quantidade ou forma.

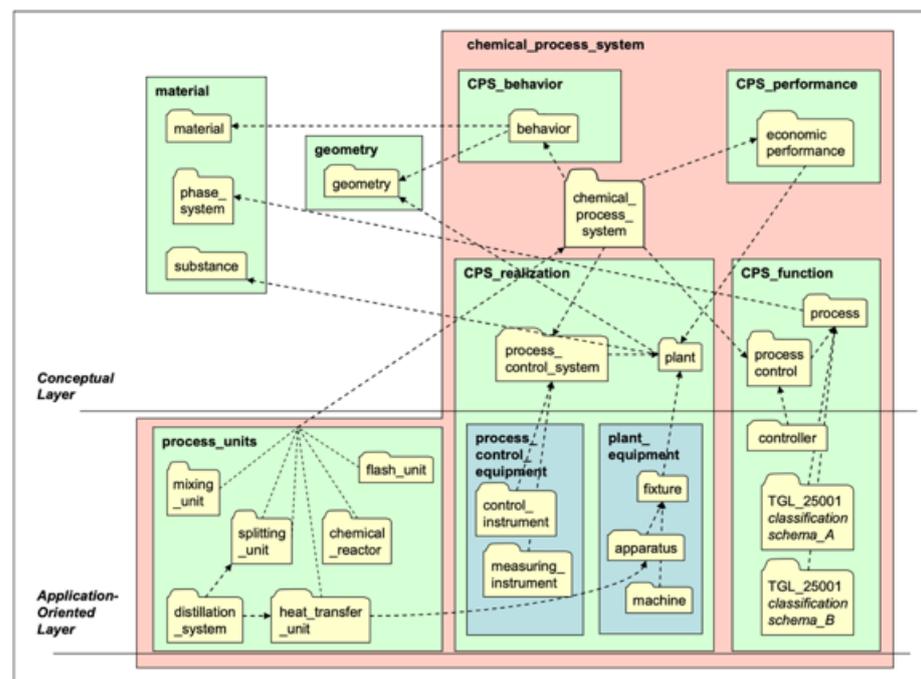


Figura 26: Visão geral do modelo parcial *chemical_process_system* da OntoCAPE.

Fonte: WEISNER et al.(2008)

Na aplicação, são considerados os diferentes níveis de abstração *Conceptual Layer* e *Application-Oriented Layer*. Nela, é realizado um agrupamento para caracterizar

funções (*cps_function*), e realizações em um sistema de processo químico (*cps_realization*).

Para o domínio de aplicação, a ontologia foi desenvolvida em *protégé*¹⁵, um *software* gratuito e aberto para uso, criado na universidade de Stanford. O formato escolhido para a aplicação foi OWL (McGuinness e Harmelen, 2004). A escolha do formato para o presente de trabalho de dissertação se deu pelo fato de que OWL é uma linguagem para representação de ontologias amplamente utilizada, na qual a OntoCAPE tem sua fundação. Além disso, a modelagem fica intuitiva para o domínio de aplicação, visto que a linguagem tem um vocabulário amplo, permitindo explorar modelos de dados de maneira mais eficiente.¹⁶

Apesar de rica em definições para sistemas de processos químicos, a OntoCAPE não possui módulos de controle de processos no contexto de I4.0. Sendo assim, uma classe denominada *control_service* é adicionada a ontologia a fim de designar as funções de controle como um serviço, do inglês, “*as a Service (aaS)*”. O termo citado é designado a qualquer coisa que seja oferecida para um cliente como um serviço a ser consumido por APIs (interfaces de aplicação) ou páginas da Web, seja ele um agente de software ou pessoa, interno ou externo, como um serviço.

A Figura 27 ilustra a ontologia proposta no presente trabalho para a representação controle do sistema de reator batelada descrito no capítulo 4. Nela, encontram-se destacadas em cinza as classes e subclasses reutilizadas da OntoCAPE, além de suas propriedades nativas (setas azuis). Em azul, destaca-se a classe “*control_service*”, criada para agrupar os serviços de controle do sistema e detalhada no item 5.2 do presente trabalho. Ainda na figura, são ilustradas as propriedades não nativas da OntoCAPE (setas cinza), detalhadas na Tabela 2.

¹⁵ <https://protege.stanford.edu/>

¹⁶ <https://cambridgesemantics.com/blog/semantic-university/learn-owl-rdfs/rdfs-vs-owl/>
<https://cambridgesemantics.com/blog/semantic-university/learn-owl-rdfs/owl-101/>

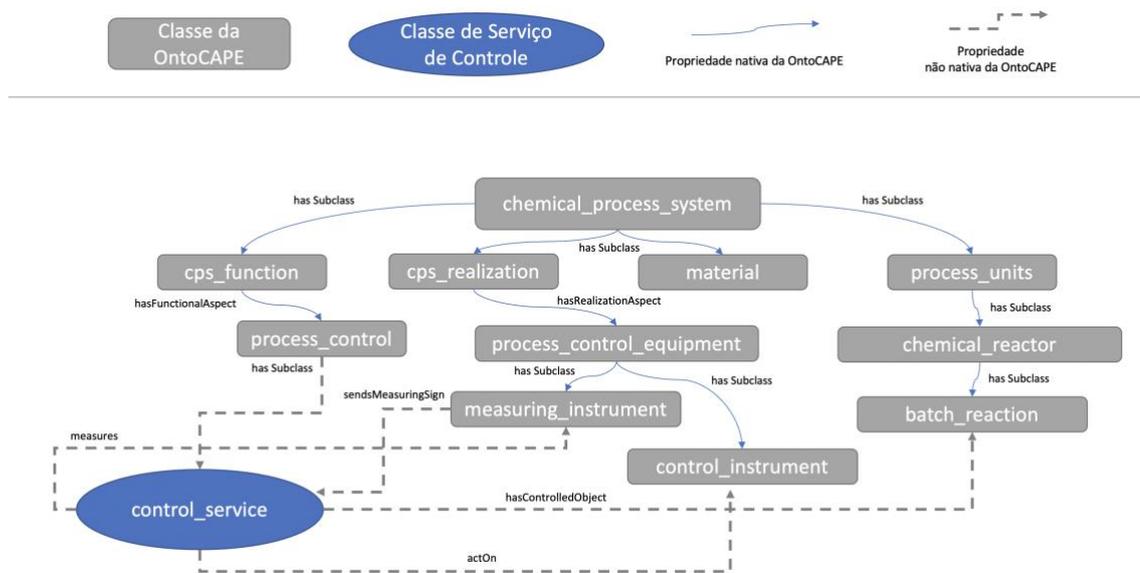


Figura 27: Ontologia para Controle de Processo no Domínio de RBatch.

Fonte: Autora

Uma ontologia pode ser vista como um conjunto de Classes, Relações, Instâncias e Axiomas.

Classes e subclasses são agrupamentos de entidades com características similares, organizadas por uma taxonomia hierárquica, ou seja, uma classificação por nível de abstracção de conceitos pertencentes a um determinado domínio de aplicação.

Relações são universos binários que ligam uma entidade a outra em uma ontologia.

A definição de instância pode ser descrita como partes de uma determinada classe ou subclasse. Ou seja, instâncias são objetos que cumprem a definição esperada dentro de um agrupamento de conceitos.

Axiomas são postulados lógicos, ou seja, um conjunto de afirmações que nos guia para o design e consistência de uma ontologia. Por exemplo, os axiomas encontrados em OWL são necessariamente aplicados ao *framework* RDF, enriquecendo a modelagem semântica de ontologias, são eles: as Relações entre classe (*disjointWith*, *complementOf*), Propriedades (*Symmetric*, *Transitive*, *inverseOf*), Propriedades de Igualdade (*SameAs*, *EquivalentClass*) e as Restrições de propriedades (*allValuesFrom* e *someValuesFrom*) (GUARINO et al., 2009).

Para a representação do domínio de estudo da dissertação, a hierarquia de classes foi definida através de uma abordagem *top-down* (definida previamente no item 3.3), onde se parte dos conceitos mais abstratos para os mais concretos. Conforme mencionado no capítulo 3, não há métodos rigorosos de senso comum para o desenho de uma ontologia, entretanto, uma série de boas práticas baseada na fundamentação teórica foi seguida no presente trabalho, são elas:

- Conhecimento do domínio de estudo
- Reutilização de outra ontologia
- Definição de Classes e Subclasses
- Especificação da taxonomia hierárquica
- Formalização de propriedades e suas restrições
- Definição das Instâncias

A Figura 28 mostra a hierarquia de classes da ontologia proposta para a representação do domínio do reator batelada, onde os módulos funcionais de função (serviços de controle de operação), realização (medições e atuação física no sistema), operação unitária envolvida (processo de reação em batelada como objeto de controle) e material (reagentes e produto de reação).

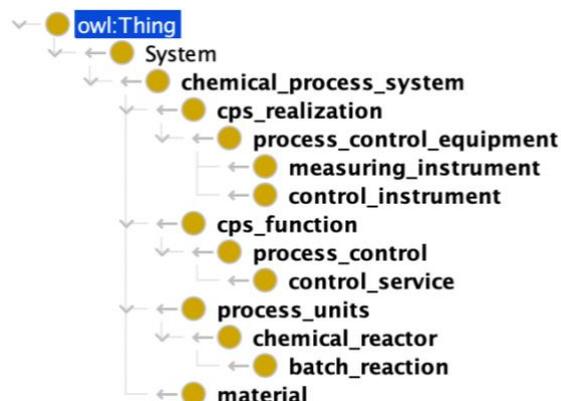


Figura 28: Hierarquia de Classes no Protégé

Fonte: Autora

O conjunto de propriedades nativas e não nativas da OntoCAPE que estabelece a ligação entre as classes da ontologia ilustrada anteriormente na Figura 27, é descrito conforme ilustra a Tabela 2.

Tabela 2: Lista de relações entre classes e suas respectivas descrições

Propriedade	Descrição
hasFunctionalAspect	Representa a relação entre a operação unitária e seus aspectos funcionais (ações desejadas)
hasRealizationAspect	Representa a relação entre a operação unitária e seus aspectos de realização (ações realizadas)
has Subclass	Representa a relação entre uma classe e sua subclasse
measures	Representa a entrada de variáveis de medição no serviço de controle
sendsMeasuringSign	Representa o envio de sinal de variáveis medidas em processo para o serviço de controle
actOn	Representa a atuação do serviço de controle em um determinado elemento do sistema ciberfísico
hasControlledObject	Objeto ao qual o processo controle será aplicado

A Figura 29 e 30, respectivamente, mostram a hierarquia de classes da ontologia proposta para a representação do domínio do reator batelada, onde os módulos funcionais de função, realização e operação unitária e a visualização completa da ontologia (classes, relações, instâncias e axiomas) através do *plug-in* de visualização *OntoGraph*.

com relação a outros que podem ser utilizados em modelagem OWL de ontologias.

5.2 Representação da aplicação: algoritmo de orquestragem e ambiente interpretador de ontologia

A aplicação de uma arquitetura de indústria 4.0 para um sistema ciberfísico visa a flexibilizar a comunicação entre as estruturas antigas de controle de processos, como a descrita no capítulo 4.

Considerando os conceitos de indústria 4.0 e cenário de manufatura inteligente, onde flexibilidade e interoperabilidade são conceitos fundamentais a serem aplicados, os procedimentos seguidos para o controle da operação da batelada foram descritos como “serviços”, definindo seus objetivos, ações desejadas (*chemical process functions*) e atuação no sistema (*chemical process realization*). Sendo assim, a operação e controle do reator de batelada são realizados através de um agrupamento de serviços de nuvem que visam a atender atividades desejadas através de atuações em um sistema físico.

A Tabela 3 descreve com detalhes os objetivos e ações de cada um dos serviços de operação e controle no domínio de aplicação e pode ser comparada com a Figura 30, onde estes estão representados como sendo instâncias da classe “*control_service*”.

Aqui, se ressalta que o controle PID de temperatura permanece no nível físico de aplicação. Para a camada *cyber*, o serviço de controle “*controls_temperature*” se refere ao controle procedural definido por Zoss (1979), descrito em detalhes no item 5.1 da dissertação. Esta, foi uma escolha realizada no design da ontologia e da arquitetura do sistema e não é um impeditivo para a criação de uma nova classe de ontologia focada em controle PID, por exemplo. Assim como este, outros aspectos de controle de processos podem ser abordados, visto que a ontologia tem uma base de propósito geral e é reutilizável.

Tabela 3: Serviços para Controle de Processos no Domínio de Aplicação

SERVIÇO	OBJETIVO	AÇÕES DESEJADAS
reset_and_start	Garantir que o processo volte as condições iniciais ao fim de cada ciclo de operação e iniciar a operação do reator batelada	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Esvaziar Reator T-151 e Drenar produto (FV-151E) ▪ Resetar contador de fluxo de entrada de reagente ▪ Fechar válvula de reagente B (opcional)
fill_reactor	Carregar reagentes no reator	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abrir válvula do reagente A ▪ Contar valor de contador de fluxo até x galões de A ▪ Abrir válvula do reagente B ▪ Carregar reagente B até valor de nível alto
level_high_high_alarm	Alarmar em situação de nível muito alto	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Parar o procedimento de enchimento do reator em caso de nível muito alto (LSHH energizado, FV-151C e FV-151D fechadas)
starts_agit	Iniciar agitação após a carga de reagentes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verificar se o enchimento do reagente B está completo ▪ Começar agitação no reator T-151
controls_temperature	Controlar temperatura no reator	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ativar válvulas de controle de temperatura (TV-151A e TV-151B) ▪ Eleva <i>setpoint</i> de temperatura até 50° C ▪ Mantém <i>setpoint</i> de temperatura em 50° C ▪ Eleva <i>setpoint</i> de temperatura até 80° C ▪ Mantém <i>setpoint</i> de temperatura em 80° C ▪ Reduz <i>setpoint</i> de temperatura em 20° C ▪ Interromper agitação no reator T-151
drain_reactor	Descarregar produto no reator	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abrir válvula de dreno de produto (FV-151E) ▪ Fechar válvula de dreno de produto ao atingir nível baixo

Considerando as tendências de transformação digital para arquitetura de informação em processos químicos apresentadas no item 3.2, pode-se perceber a adoção de um novo paradigma arquitetural, orientado a domínios funcionais modularizáveis, no sentido de que agrupamento de funções e flexíveis, no sentido

de interação entre diferentes tecnologias. Ou seja, o que antes era hierárquico, com novas tecnologias de computação e arquitetura em nuvem, agora pode ser orientado a microserviços (KWAN et al., 2016) (THÖNES, 2015) (HUSTAD e OLSEN, 2021).

A fim de conectar microserviços para atender a um determinado propósito, duas abordagens são comumente utilizadas. São elas: orquestragem, quando há um elemento central para controlar as interações entre os serviços em uma arquitetura e coreografia, onde cada serviço atua de maneira independente e interage com os outros pontualmente (PELTZ, 2003). Bigheti et al. (2020) exploram uma arquitetura orientada a microserviços para o controle de processos.

Em serviços ou API sempre tem realmente uma interface que deve interagir com outros serviços. Portanto a orquestração é coordenar as atividades de fluxo de trabalho, incluindo atividades internas (que interagem com aplicativos internos), e atividades interagindo com outros serviços externos (através da sua interface). Este orquestrador está dentro do domínio da ontologia criada.

Coreografia é a especificação de interações entre os serviços entre si, pode ter uma entidade ou apenas atuar como um “contrato” (regras) entre os serviços envolvidos, sem um serviço extra coordenando a lógica de colaboração entre esses serviços.

Orquestração é uma forma centralizada para atuação de um grupo de lógicas (serviços) e coreografia é entendida aqui como uma interação descentralizada. Para interoperabilidade e flexibilidade de um conjunto no processo industrial, é claro que se necessita de um orquestrador. Mas aqui está se descrevendo a orquestragem e coreografia dentro da ontologia de um domínio específico de controle de processos industriais. Sequenciamento procedural em um processo, e a sincronização de vários serviços para esse processo, por exemplo, precisa de orquestrador. Existem softwares para testes de orquestragem e coreografia de serviços de Web, mas não foram encontrados estes testes em nenhum trabalho de controle de processos como serviços.

Stutz et al. (2020) comparam a escolha de orquestração e coreografia dentro das categorias de acessibilidade, operação, desdobramento, hierarquia e

complexidade. Mas no presente trabalho acredita-se que a maior questão para a escolha está nas características de interoperabilidade dadas por uma coordenação externa e o nível de sistema colaborativo entre serviços que se deseja.

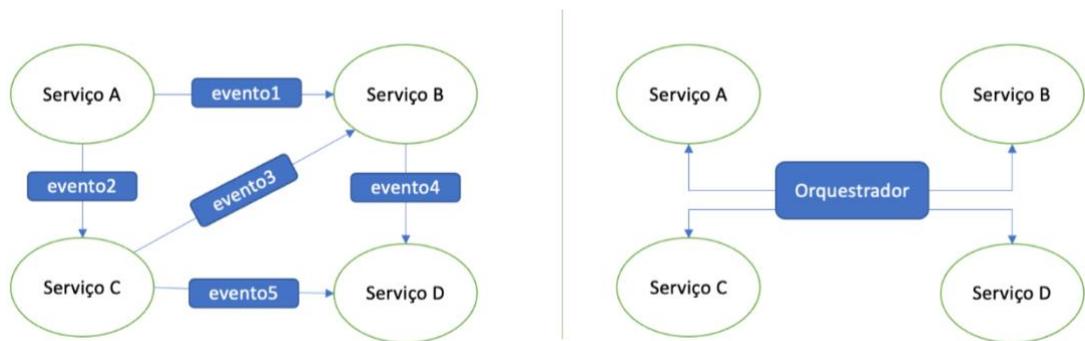


Figura 31: Abordagens para arquitetura de microserviços

Fonte: Autora

Para o domínio de aplicação da ontologia, cada uma das etapas da sequência de operação, mencionadas no capítulo 4, foi considerada como um componente de software para a oferta de serviços de controle a fim de alcançar o objetivo funcional esperado. As interações entre os serviços podem acontecer conforme ilustra a Figura 32. Na aplicação, não são abordados os aspectos de escolha arquitetural no sentido de melhor eficiência e monitoramento. Stutz et al. (2020) exploram as metodologias de arquitetura supracitadas no contexto de sistemas da informação para automação. O detalhamento das interações entre os serviços para o domínio de Zoss (1979) é descrito pelos pseudocódigos no Apêndice A da presente dissertação.

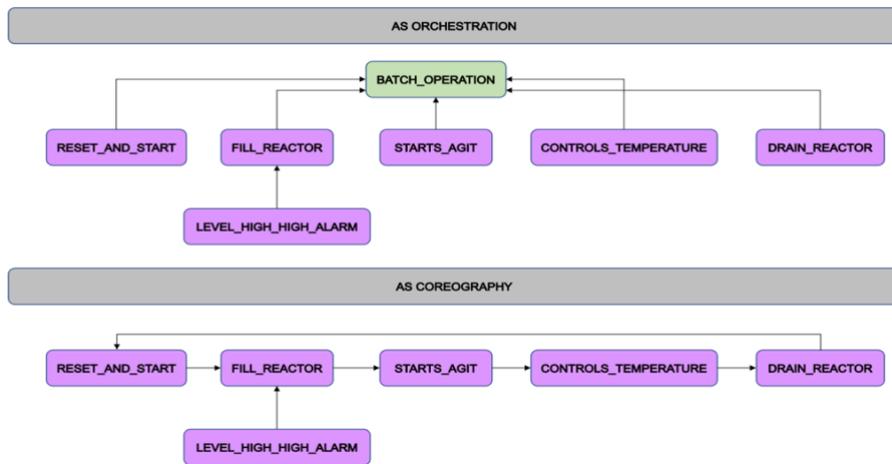


Figura 32: Arquitetura de Microserviços como Orquestração vs Coreografia

Fonte: Autora

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O controle do reator de batelada em PLC tem seguintes tarefas: sequência de enchimento do reator, alarme de nível high-high, ação de agitador e seu alarme, controle procedural através de temperatura, e sequência de drenagem. A migração para o lado *cyber* do CPS através do uso de ontologia é, segundo a Tabela 3, através de *reset_and_start*, *fill_reactor*, *level_high_high_alarm*, *starts_agit*, *controls_temperature* e *drain_reactor*.

Por exemplo, a checagem em PLC das condições obrigatórias na fase de enchimento tais como o tanque vazio (relé LSL-151 fechado), válvula de dreno fechado (relé ZSL-151E fechado), acumulador de vazão “resetado” (relé FQS-151 fechado) e válvula de produto B fechado (relé ZSL-151D fechado), ou a checagem antes de iniciar a carga do reagente B, a válvula de dreno fechado (relé ZSL-151E fechado), a válvula de reagente A fechado (ZSL-151C fechado), volume para carga no reator disponível (LSH-151 fechado), são facilmente orquestrado ou coreografado através de ontologia conforme ilustrado em Apêndice A.

A entrada da condição do relé 2CR do diagrama *ladder* nas linhas 4 e 7 (Figura 24) dando condição para sustentar enchimento e passagem automático/manual pode ser mais facilmente configurado em programação computacional, incluindo o seu desdobramento a partir da linha 7 da Figura 24, que ativa HY-151A, apenas como exemplo.

Sendo diagrama *ladder* uma programação lógica sequencial, nota-se a complexidade gerada por múltiplas entradas, como por exemplo pelo relé 4CR da figura 24, que tem três pontos de contato na linha 6, 10 e 11, só para ilustrar como exemplo o início de *ladder* que é a fase de enchimento. Essa complexidade continua mesmo que se analise *exata e literalmente* o diagrama *ladder* através de redes de Petri¹⁷.

O sistema de alarmes e ações requeridas de segurança e intertravamento no diagrama *ladder*, tais como sinal de LSHH-151 que atua em HY-151C e HY-151D e

¹⁷ Para Petri Net, ver por exemplo, Gu, T., Bahri, P. A. (2002). A survey of Petri net applications in batch processes. *Computers in Industry*, 47(1), 99-111, e Tittus, M., Åkesson, K. (1999). Petri net models in batch control. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 5(2), 113-132.

consequentemente fecha as válvulas FV-151C e FV-151D, além de alarmes sinóticos e buzinas são questões adicionais de criação de complexidade em *ladder*. Por exemplo, este tipo de circuito de alarmes e intertravamento se encontra em linhas 7, 11, 13-18, 19-25, etc. Tais procedimentos se tornam mais flexíveis através de orquestração utilizando ontologia, como na Figura 32, por exemplo.

Quando se trata de aspectos de segurança, apesar do caso de uso ilustrado na Figura 32 representar apenas os alarmes de nível (considerados no serviço *level_high_high_alarm*), outros aspectos de *Process Safety* podem ser facilmente incluídos como um novo serviço e abstração na camada semântica. As condições de agitação foram contempladas no pseudocódigo como pacote de serviço por ser sequencial e não condicional como os alarmes de níveis.

O objetivo do trabalho não é analisar exaustivamente o sistema de batelada tradicional, mesmo porque no trabalho de Zoss (1979), muito antigo, não se utilizaram nem as normas ISA 88 e ISA 95, e sim mostrar como pode se deslocar para o lado computacional de sistema CPS. Entretanto todas as funcionalidades do *ladder* foram organizadas como componentes de software na arquitetura e na ontologia elaborada aqui, incluindo orquestragem e coreografia.

“Componentização” dos serviços de controle, conforme ilustrado no apêndice A, foi escolhida para demonstrar uma arquitetura de informação em nuvem, onde componentes de *software* representam as funcionalidades do diagrama *ladder*. Para esse tipo de arquitetura, as abordagens de coreografia e orquestragem são exploradas aqui.

Conforme ilustra a Figura 32 do Capítulo anterior, complementado pelos pseudocódigos do apêndice A, ao se levar em consideração a sequência de operação original e as intervenções entre os componentes físicos do sistema, o cenário de coreografia representa tal como era em diagrama *ladder* (“*as is*”), ou seja, de como os serviços se comunicam a fim de alcançar os objetivos finais de cada uma dessas etapas. Neste cenário, os serviços têm acoplamentos suaves e podem ser mudados ou escalados separadamente. Outro ponto é que, em caso de falha de um serviço os outros podem continuar a receber e enviar eventos.

A construção e a análise da arquitetura orientada a eventos não foram exploradas no presente trabalho. Aqui o propósito era mostrar a arquitetura orientada

a serviços, mas poderia ser analisada como orientada a eventos como por exemplo detecção de nível *high-high* ou falha no agitador. A escolha do tipo de abordagem arquitetural a ser escolhida depende de fatores como observabilidade em caso de falhas e tempo de processamento, por exemplo. Por isso, um ponto a ser melhor explorado, não abordado na presente dissertação, é a exploração de gestão de arquitetura orientada a eventos.

Já para o cenário de orquestragem, um “serviço mestre” é adicionado ao cenário. Este considera a operação de batelada como um todo e, para que a orquestragem aconteça, cada uma das etapas emite um *status* de completude, para que o serviço orquestrador siga para a próxima etapa.

As tecnologias evoluem para serem cada vez mais inteligentes, flexíveis e com seu ciclo de vida prolongado, o que traz mais flexibilidade também para o compartilhamento de informações. No estudo para reatores em batelada, as informações de controle poderiam ser combinadas e exploradas com a função de avaliar a performance do processo ou a gestão de matéria prima de maneira inteligente. Assim os modelos para arquiteturas de *software* e micros serviços habilitariam a modularidade de funções permitindo que as informações sejam combinadas e reaproveitadas de acordo com necessidades cada vez mais personalizáveis, o que demonstra a flexibilidade na arquitetura proposta no Capítulo anterior.

Diante de arquiteturas convencionais, como a que indica ISA 95, por exemplo, não há espaço para a modularidade de funções, dadas as suas limitações de comunicação. Ou seja, a troca de informações a nível corporativo e no “chão de fábrica”, quando feita desta maneira, dificulta a adequação às mudanças rápidas para novas arquiteturas de controle e adequação ao setor de tecnologia da automação.

Sendo assim, o uso de arquiteturas de software em nuvem é adequado para as ontologias no contexto de Indústria 4.0, onde o foco está em funções específicas com extensões, interconectividades e modularidades funcionais, possibilitando o compartilhamento e reuso do domínio de conhecimento sob domínios de estudo.

Em contrapartida, novas arquiteturas de comunicação industrial permitem, além da implementação de modelos e observadores, uma abertura para a aplicação de *digital twin* e *machine learning* localmente, no chão de fábrica. Isso habilita a adoção de soluções que utilizem componentes *as a service* e consumo de serviços em nuvem, que, por sua vez, se faz vantajosa pela escalabilidade no desenvolvimento de soluções e resolução de problemas. Isto é, não se descreveu gêmeo digital e

aprendizagem de máquina no trabalho por ser além do presente escopo, mas alerta-se que a sua incorporação no CPS é facilmente escalonada através novas camadas na ontologia.

Isto não significa que as estratégias de controle avançado deixarão de ser empregues e sim que o controle moderno será utilizado através da integração ciberfísica entre o processo industrial, sistemas de controle, sistema de decisão e o banco de dados (*Process History Database*). Arquiteturas que seguem essa linha são encontradas nos trabalhos de SANCHEZ et al. (2016) e SCHWEICHHART (2016).

Foi necessário descrever, ainda que brevemente, as normas existentes que estão se adequando ao CPS, ainda que trabalhos de elaboração de ontologia possa independer das normas que abarcarão na implementação. Não se detalhou aqui a questão de sensores e elementos finais, que dentro das características “*smart*” e em ilhas de computação “*frog*” poderiam, dentro ontologia, ser mais adequados para coreografia do que para orquestração. Isto porque os elementos para entendimento desta ontologia e sua coreografia já está ilustrado no estudo de caso.

Qualquer interface de *software*, assim chamados de API (*Application Programming Interface*), precisa se comunicar. Outro aspecto que tem relação com a construção da ontologia, caso se considere como microserviços, são as normas de comunicação industrial, tais como TCP/IP, *FieldBus* com IE-Industrial Ethernet, ModBus, e outros de natureza proprietária de empresas. A própria OPC UA é um protocolo de comunicação usado em aplicações industriais, especialmente em diferentes tipos de sistemas de automação. Ele foi criado para permitir comunicação independente de plataforma entre diferentes dispositivos e aplicativos, oferecendo métodos de comunicação unificada.

Apesar do estudo de caso se tratar de controle através de PLC, a familiaridade em elaboração da ontologia é diretamente aplicável em processos contínuos com controle por DCS. Esta aplicação é muito interessante porque tem que elaborar ontologias em duas hierarquias, a de alto nível para as “ilhas” de processos que interagirão (em princípio pode-se pensar essas ilhas como operações unitárias, mas pode-se ir além disso para “*plant-wide coordination*”) junto com o nível de gestão e economia, e o nível inferior de controle de processos em “chão de fábrica”. Em ambos

os níveis a interoperabilidade é uma qualidade desejável hoje. Esse é um motivo adicional, no presente trabalho para optar pelo OWL na sua forma OntoCAPE, mais familiar à Engenharia Química, do que a norma MTP (também conhecido como NAMUR). Outro aspecto interessante é que DCS, diferentemente de PLC, necessariamente tem uma HMI (*human-machine interface*) o que significa que se deve incluir esse aspecto na ontologia.

No trabalho, se fala em “familiaridade em construir ontologia”, e não em métodos específicos para sua construção, para não dar a falsa impressão de que existem metodologias sendo consolidadas. O que existem são normas que podem corresponder adequadamente às características da ontologia elaborada, a sua conceituação e recomendações de arquitetura e passos de construção.

Se os elementos e sistemas de controle são migrados para o lado “cyber” de CPS, eles são aplicações computacionais API (*Application Programming Interface*) como um *aaS* (*as a Service*)¹⁸. A arquitetura de software de um sistema de computação é o conjunto de estruturas necessárias para raciocinar sobre o sistema, que compreende elementos de software, relações entre eles e propriedades de ambos, usado para dividir a estrutura do software em componentes distintos ao definir a relação entre eles. Não poderia haver uma argumentação melhor do que isso para mostrar que a ontologia é o desafio e a chave para sistema CPS. Assim como toda arquitetura de software, CPS com seus níveis de hierarquia e sua estrutura em domínios, em sua essência, considera que a estrutura melhor trabalhada é sob a forma de camadas (*layered*). Por isso a ontologia apresentada aqui no trabalho mostra as camadas.

Outro aspecto não abordado aqui, porque o trabalho trata da demonstração da visão de ontologia em CPS, e não de sua implementação, é qual a linguagem de programação computacional a ser adotada (.NET, #C, MATLAB etc.) nem os 5 requisitos (*requirements*) de programação (*Performance, Maintainability, Configurability, Safety, Security*), nem a descrição de fluxo de dados e *databases*.

¹⁸ Considerando o controle como micros serviços, note-se que então se trata de sistema de micros serviços altamente distribuído. Falou-se aqui em micros serviços sem muitos detalhes. Um entendimento mais holístico pode ser visto Rajasekharaiah, C. (2021). *Cloud-Based Microservices: Techniques, Challenges, and Solutions*. Apress Springer

7 CONCLUSÃO

Apesar da grande adesão industrial ao ecossistema de inovação, definir se o setor de automação está pronto para a transformação digital ainda é algo difícil visto que o fornecimento de tecnologias (sensores inteligentes, CLPs, arquiteturas e *hardwares*) está em constante desenvolvimento e existem diferentes modelos propostos de maturidade e prontidão para uma “*smart factory*”. Sendo assim, é mais fácil definir se uma unidade fabril está, ou não, pronta para a transformação digital.

Isto não significa que as estratégias de controle avançado deixarão de ser empregues e sim que o controle moderno será utilizado através da integração ciberfísica entre o processo industrial, sistemas de controle, sistema de decisão e o banco de dados (*Process History Database*)¹⁹.

Com o grande volume e variedade de dados que acompanham as evoluções tecnológicas e geração de produtos e serviços com uma abordagem centrada no cliente, as tecnologias *on premisses* para *storage* e *analytics* tendem a ter seu ciclo de vida encurtado.

Excesso de normas e padrões não é salutar para as aplicações discutidas aqui. Tanto as organizações quanto os fornecedores de tecnologia estão sob uma grande pressão para convergir em poucas normas e se possível com protocolos abertos, e irão continuamente sofrer modificações. Portanto estudo de ontologia aplicada, ou de testes em simulação não pode ser amarrado a normas.

O uso de ontologia para controle de processos industriais, e ainda mais o conceito de controle como micros serviços e *aaS* (*as a Service*) são aplicações muito novas e emergentes, portanto, é de grande importância entender esse uso de ontologia enquanto abstração e conceito para arquitetura de CPS, o que se mostra como uma apropriação da base de conhecimento (*Knowledge Base*) e da tecnologia de informação para o controle de processos.

¹⁹ Arquiteturas que seguem essa linha são encontradas nos trabalhos de SANCHEZ et al. (2016) e SCHWEICHHART (2016).

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBURU, SUNITHA. A survey on ontology reasoners and comparison. **International Journal of Computer Applications**, v. 57, n. 17, 2012.
- ACETO, G., PERSICO, V., PESCAPÉ, A. **A Survey on Information and Communication Technologies for Industry 4.0: State-of-the-Art, Taxonomies, Perspectives, and Challenges**. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, num. 4, 3467-3501. 2019.
- AKDIL, K. Y., USTUNDAG, A., e CEVIKCAN, E. **Maturity and readiness model for industry 4.0 strategy**. Em: Industry 4.0: Managing the digital transformation (pp. 61-94). Springer, Cham, 2018.
- ANTONIOU G., VAN HARMELEN F. **Web Ontology Language: OWL**. Em: Staab S., Studer R. *Handbook on Ontologies. International Handbooks on Information Systems*. ed Springer, 2004.
- BAHETI, R.; GILL, H. **Cyber-physical systems**. The impact of control technology, v. 12, n. 1, p. 161-166, 2011.
- BARRETO, L.; AMARAL, A.; PEREIRA, T. **Industry 4.0 implications in logistics: an overview**. Procedia Manufacturing, v. 13, p. 1245-1252, 2017.
- BATCHKOVA, I. A., TZAKOVA, D. L., BELEV, Y. A. **Standards for monitoring and control of cyber-physical systems**. Industry 4.0, vol. 4, num.1, p.3-6. 2019.
- BATHELT, A., RICKER, N. L., JELALI, M., **Revision of the Tennessee Eastman Process Model**. 9th International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes, 2014.
- BATRES, Rafael. **Ontologies in Process Systems Engineering**. Chemie Ingenieur Technik, v. 89, n. 11, p. 1421-1431, 2017.
- BERNSHAUSEN, J., HALLER, A., HOLM, T., HOERNICKE, M., OBST, M., LADIGES, J. (2016). **Namur Modul Type Package–Definition**. atp magazin, 58(01-02), 72-81 (German)
- BIGHETI, J. A., FERNANDES, M. M.; GODOY, E.P. **Control as a service: A microservice approach to industry 4.0**. Em: 2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4. 0&IoT). Ieee, p. 438-443, 2019.
- BRANDL D. e JOHNSON C. **Beyond the Pyramid: Using ISA95 for Industry 4.0/Smart Manufacturing: Combine ISA95 (IEC 62264) knowledge with smart manufacturing reference models to advance manufacturing**. Em: InTech: Official Publication of The International Society of Automation, 2021.
- BURNS, T., COSGROVE, J., DOYLE, F. **A Review of Interoperability Standards for Industry 4.0**. Procedia Manufacturing, vol.38, p.646-653. 2019

- CAMERON, I., LEE, J. e HASSALL, M. **Improving process safety: What roles for Digitalization and Industry 4.0.** *Process Safety and Environmental Protection*, v. 132, p. 325-339, 2019.
- CAMPBELL, W., FIRTH, S. K., TOPRAC, A. J., e EDGAR, T. F. **A comparison of run-to-run control algorithms.** Em: *Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No. CH37301)*. IEEE, p. 2150-2155, 2002.
- CAMPOS, M. L. A., **O papel das definições na pesquisa em ontologia.** *Perspectivas em Ciência da Informação*, v. 15, n.1, p. 220-238, 2018.
- CHENG, G. J., LIU, L. T., QIANG, X. J., e LIU, Y. **Industry 4.0 development and application of intelligent manufacturing.** Em: *2016 international conference on information system and artificial intelligence (ISAI)*. IEEE, p. 407-410, 2016.
- COLOMBO, A. W., BANGEMANN, T., e KARNOUSKOS, S. **IMC-AESOP outcomes: Paving the way to collaborative manufacturing systems.** Em: *12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, pp. 255-260, 2014.
- CUKOVIC, S., DEVEDZIC, G., GHIONEA, I., FIORENTINO, M., e SUBBURAJ, K. (2016). **Engineering design education for industry 4.0: implementation of augmented reality concept in teaching CAD courses.** Em: *Proceedings of The International Conference on Augmented Reality for Technical Entrepreneurs (ARTE'16)* (pp. 11-16), 2016
- DEL CASTILLO, E.; HURWITZ, A. M. **Run-to-run process control: Literature review and extensions.** *Journal of Quality Technology*, v. 29, n. 2, p. 184-196, 1997.
- DOWNS, James J.; VOGEL, Ernest F. **A plant-wide industrial process control problem.** *Computers & chemical engineering*, v. 17, n. 3, p. 245-255, 1993.
- ESEN, H., ADACHI, M., BERNARDINI, D., BEMPORAD, A., ROST, D., e KNODEL, J. **Control as a service (CaaS) cloud-based software architecture for automotive control applications.** In: **Proceedings of the Second International Workshop on the Swarm at the Edge of the Cloud**, p. 13-18, 2015.
- EIFERT, T., EISEN, K., MAIWALD, M., & HERWIG, C. **Current and future requirements to industrial analytical infrastructure—part 2: smart sensors.** *Analytical and bioanalytical chemistry*, v. 412, n. 9, p. 2037-2045, 2020.
- EISEN, K., EIFERT, T., HERWIG, C., & MAIWALD, M. **Current and future requirements to industrial analytical infrastructure—part 1: process analytical laboratories.** *Analytical and bioanalytical chemistry*, v. 412, n. 9, p. 2027-2035, 2020.
- ENGEL, G., GREINER, T., SEIFERT, S. **Ontology-assisted engineering of cyber-physical production systems in the field of process technology.** *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 14, n. 6, p. 2792-2802, 2018.
- FRANK, A. G., DALENOGARE, L. S., & Ayala, N. F. **Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies.** *International Journal of Production Economics*, 210, 15-26, 2019.

- GLIMM, B., HORROCKS, I., MOTIK, B., STOILOS, G. e WANG, Z. (2014). **HerMiT: an OWL 2 reasoner**. *Journal of Automated Reasoning*, 53(3), p. 245-269.
- GODOY, R.J.C., GARCIA, C. **Plantwide control: A review of design techniques, benchmarks, and challenges**. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v.56, n.28, p.7877-7887. 2017.
- GHOBAKHLOO, M. **The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0**. Em: *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2018.
- GUARINO, N., OBERLE, D., STAAB, S. (2009). What is an ontology?. In Staab, S, Studer, R. **Handbook on ontologies** (pp. 1-17). 2009. Springer
- HALAWEH, M. **Emerging technology: What is it**. *Journal of technology management & innovation*, v. 8, n. 3, p. 108-115, 2013.
- HANNELIUS, T.; SALMENPERA, M.; KUIKKA, S. **Roadmap to adopting OPC UA**. Em: 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics. IEEE, 2008. p. 756-761, 2008.
- HAVRE, K.; SKOGESTAD, S. **Selection of variables for regulatory control using pole vectors**. *IFAC Dynamics and Control of Process Systems*, Confu, Greece, 1998.
- HILDEBRANDT, C., KÖCHER, A., KÜSTNER, C., LÓPEZ-ENRÍQUEZ, C. M., MÜLLER, A. W., CAESAR, B., GUNDLACH, C. S., FAY, A. **Ontology building for cyber–physical systems: Application in the manufacturing domain**. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17(3), 1266-1282. 2020.
- HOFFMANN M., BUSCHER, C., MEISEN, T., JESCHKE, S., **Continuous integration of field level production data into top-level information systems using the OPC interface standard**. *Procedia CIRP* 41, pp 496 – 501 - CIRP CMS, 2016.
- HOFMANN, D., MARGULL, R., DITTRICH, P.G., DUNTSCH, E., **Smartphone Green Vision at Dawn of Industry 4.0**. *Advanced Materials Research Vols. 403-408*, pp 4079-4083, 2012.
- HOLM, T., LADIGES, J., URBAS, L., FAY, A., OBST, M., ALBERS, T., HEMPEN, U.. **Namur Modul Type Package–Implementierung**. atp edition, 58(01-02), 82-90, 2016.
- HU, F. **Cyber-physical systems: integrated computing and engineering design**. CRC Press, 2013.
- HUSTAD, E. e OLSEN, D. H. **Creating a sustainable digital infrastructure: The role of service-oriented architecture**. Em: *Procedia Computer Science*, v. 181, p. 597-604, 2021.
- IEEE. **INTEROPERABILITY MATURITY ROADMAP IEEE Std 2030.5**. 2019

- INDUSTRIAL INTERNET CONSORTIUM. **Industrial Internet Reference Architecture**: <https://www.iiconsortium.org/IIRA.htm>. Acessado em 30 de janeiro de 2022.
- ISOTANI, S., BITTENCOURT, I. I. **Dados Abertos Conectados** disponível em: <https://ceweb.br/livros/dados-abertos-conectados/>, 2015.
- ISSA, A., HATIBOGLU, B., BILDSTEIN, A., BAUERNHANSL, T. **Industrie 4.0 roadmap: Framework for digital transformation based on the concepts of capability maturity and alignment**. *Procedia CIRP*, 72, 973-978. 2018
- IVANOV, D., SETHI, S., DOLGUI, A., e SOKOLOV, B. **A survey on control theory applications to operational systems, supply chain management, and Industry 4.0**. Em: *Annual Reviews in Control*, 46, p. 134-147, 2018.
- JACOB E.K., **Ontologies and The Semantic Web** *Bulletin of the American Society for Information Science and Technology*, 2003.
- JAYAKUMAR, N. S., AGRAWAL, A., HASHIM, M. A., & SAHU, J. N. **Modeling the effect of wall capacitance on the dynamics of an exothermic reaction system in a batch reactor**. Em: *International journal of heat and mass transfer*, 54(1-3), p. 439-446, 2011.
- JAZDI, N. **Cyber physical systems in the context of Industry 4.0**. Em: *IEEE international conference on automation, quality and testing, robotics*. IEEE, 2014. p. 1-4, 2014.
- KERIN, M., & PHAM, D. T. **A review of emerging industry 4.0 technologies in remanufacturing**. *Journal of cleaner production*, 237, 117805, 2019.
- KIRMSE, A., KRAUS, V., LANGER, T., POMP, A., & MEISEN, T. **How To RAMI 4.0: Towards an Agent-based Information Management Architecture**. Em: *2019 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS)*, pp. 961-968, 2019.
- KOGUT, P., CRANFIELD, S., HART, L., DUTRA, M., BACLAWSKI, K., KOKAR, M., SMITH J., **UML for ontology development** *The Knowledge Engineering Review*, Vol. 17:1, 61–64, 2002.
- KRÄMER, B. **Evolution of cyber-physical systems: a brief review**. Em: *Applied Cyber-Physical Systems*. Springer, New York, NY, p. 1-3, 2014.
- KUMAR, V. R., KHAMIS, A., FIORINI, S., CARBONERA, J. L., ALARCOS, A.O., HABIB, M., GONCALVES, P., LI, H., e OLSZEWSKA, J.I. **Ontologies for Industry 4.0**. *The Knowledge Engineering Review*, Vol. 34, e17, 1 de 14, 2019.
- KWAN, A., JACOBSEN, H. A., CHAN, A., e SAMOOJH, S. **Microservices in the modern software world**. Em: *Proceedings of the 26th Annual International Conference on Computer Science and Software Engineering*, pp. 297-299, 2016.

- LASTRA, J. L. M., DELAMER, M. (2006). **Semantic web services in factory automation: fundamental insights and research roadmap**. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2(1), 1-11.
- LEE, E. A., **Cyber Physical Systems: Design Challenges**. Em: 11th IEEE Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC), 2008.
- LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. **A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems**. Em: Manufacturing letters, v. 3, p. 18-23, 2015.
- LEITÃO, P.; COLOMBO, A. W.; KARNOUSKOS, S. **Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges**. Em: Computers in Industry, v. 81, p. 11-25, 2016.
- LEPUSCHITZ, W., LOBATO-JIMENEZ, A., AXINIA, E., & MERDAN, M. **A survey on standards and ontologies for process automation**. Em: International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems pp. 22-32. Springer, Cham, 2015.
- LEPUSCHITZ, W., LOBATO-JIMENEZ, A., GRUN, A., Hobert, T. MERDAN, M. **An industry-oriented ontology-based knowledge model for batch process automation**. In: 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), p. 1568-1573, 2018.
- LEVINE, W. S. **The control handbook: control system applications**. CRC press, 2011.
- LI, Q., JIANG, H., TANG, CHEN, Q. Y., LI, J., e ZHOU, J., **Smart manufacturing standardization: reference model and standards framework**. Em: "OTM International Conferences, On the Move to Meaningful Internet Systems", 2016: Springer.
- LIU, K., CHEN, Y., ZHANG, T., TIAN, S., e ZHANG, X. **A survey of run-to-run control for batch processes**. Em: ISA transactions, 83, pp 107-125, 2018.
- LÓPEZ, A., ESTÉVEZ, E., CASQUERO, O., MARCOS, M. (2020, June). Using industrial standards for modeling flexible manufacturing systems. In 2020 IEEE Conference on Industrial Cyberphysical Systems (ICPS) (Vol. 1, pp. 41-46). IEEE.
- LU, H., GUO, L., AZIMI, M., HUANG, K. **Oil and Gas 4.0 era: A systematic review and outlook**. Em: Computers in Industry, vol.111, p.68-90, 2019.
- LU, Y., MORRIS, K. C., FRECHETTE, S. J. N. I. o. S., and N. Technology, "**Current standards landscape for smart manufacturing systems**," vol. 8107, p. 39, 2016.
- LUYBEN, W. L. **Chemical reactor design and control**. Ed. John Wiley & Sons, 2007.
- LUYBEN, W. L. **Simple regulatory control of the Eastman process**. Industrial & engineering chemistry Research, v. 35, n. 10, p. 3280-3289, 1996.

- MAHNKE, W., LEITNER, S. H., DAMM, M. **OPC unified architecture**. Springer. 2009.
- MARQUARDT, W., MORBACH, J., WIESNER, A., YANG, A. **OntoCAPE: A Re-Usable Ontology for Chemical Process Engineering**. Springer. 2010.
- MCAVOY, T. J. **Comments on “Simple Regulatory Control of the Eastman Process”**. Industrial & engineering chemistry research, v. 36, n. 5, p. 1953-1953, 1997.
- MCGUINNESS, D. L., & Van HARMELEN, F., **OWL web ontology language overview**. *W3C recommendation*, 10(10), 2004.
- MEISSNER, H., ILSEN, R., AURICH, J. C.. **Analysis of control architectures in the context of Industry 4.0**. *Procedia cirp*, v. 62, p. 165-169, 2017.
- MORBACH, J., BAYER, B., WIESNER, A., YANG, A., MARQUARDT, W. (2008). **OntoCAPE 2.0. The Upper Level**. RWTH Aachen University, Aachen, Germany.
- MUÑOZ, E., ESPUÑA, A., e PUIGJANER, L., **Towards an ontological infrastructure for chemical batch process management**. *Computers & chemical engineering*, 34(5), 668-682, 2010.
- NATARAJAN, S.; GHOSH, K.; SRINIVASAN, R.; **An Ontology for Distributed Process Supervision of Large-Scale Chemical Plants**. *Computers and Chemical Engineering*, 46. p. 124-140. 2012.
- NOY, N. F. e MCGUINNESS D. L. **Ontology development 101: A guide to creating your first ontology**, 2001.
- NOY, N. F., CRUBÉZY, M., FERGERSON, R. W., KNUBLAUCH, H., Tu, S. W., VENDETTI, J., e MUSEN, M. A.. **Protégé-2000: an open-source ontology-development and knowledge-acquisition environment**. In AMIA. Annual Symposium proceedings. AMIA Symposium, pp. 953-953, 2003.
- NIKKHOU, S., TAGHIZADEH, K., e HAJIYAKHCHALI, S. **Designing a Portfolio management maturity model (Elena)**. Em: *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 226, 318-325, 2016.
- PICKLER, M. **Semantic Web: ontologies as tools of knowledge representation**. *Perspectivas em Ciência da Informação*, v. 12, p. 65-83, 2007.
- PELTZ, C. **Web services orchestration and choreography**. *Computer*, v. 36, n. 10, p. 46-52, 2003.
- ROTOLO, D., HICKS, D, MARTIN, B. R. **What is an emerging technology?** *Research policy*, v. 44, n. 10, p. 1827-1843, 2015.

- RÜßMANN, M., LORENZ, M., GERBERT, P., WALDNER, M., JUSTUS, J., ENGEL, P., e HARNISCH, M. **Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries**. Boston Consulting Group, 9(1), 54-89, 2015.
- SÁNCHEZ, B. B.; ALCARRIA, R.; SÁNCHEZ-DE-RIVERA, D; SÁNCHEZ-PICOT, A. **Enhancing Process Control in Industry 4.0 Scenarios using Cyber-Physical Systems**. Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications,7:4. pp. 41-64, 2016
- SANTOS, M.; MANHÃES, A. M.; LIMA, A. R. **Indústria 4.0: desafios e oportunidades para o Brasil**. Anais do X SIMPROD, 2018.
- SERPANOS, D. **The cyber-physical systems revolution**. Computer, v. 51, n. 3, p. 70-73, 2018.
- SCHWAB, K. **The Fourth Industrial Revolution**. World Economic Forum, 2016.
- SCHLEIPEN, M., DAMM, M., HENßEN, R., LÜDER, A., SCHMIDT, N., SAUER, O., e HOPPE, S. **OPC UA and AutomationML–collaboration partners for one common goal: Industry 4.0**. Em: 3rd AutomationML User Conference, 2014.
- SCHNEIDER, G. F., WICAKSONO, H., OVTCHAROVA, J., **Virtual Engineering of Cyber-Physical Automation Systems: The Case of Control Logic**. Advanced Engineering Informatics 39, pp. 127-143, 2019.
- SCHUMACHER, A., EROL, S., e SIHN, W. **A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises**. Em: Procedia Cirp, 52, 161-166, 2016.
- SCHWEICHHART, K., **Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0)**. An Introduction, 2016.
- SEBORG, D. E., MELLICHAMP, D. A., EDGAR, T. F., e DOYLE III, F. J. **Process dynamics and control**. John Wiley & Sons, 2017.
- SCHÜTZE, A., HELWIG, N., SCHNEIDER, T. **Sensors 4.0–smart sensors and measurement technology enable Industry 4.0**. Em: Journal of Sensors and Sensor systems, v. 7, n. 1, p. 359-371, 2018.
- SULTANOW, E. e CHIRCU, A. **A review of IoT technologies, standards, tools, frameworks and platforms**. Em: The Internet of Things in the Industrial Sector, 3-34, 2019.
- STEARNS, P. N. **The Industrial Revolution in World History**. Routledge, 2018.
- STUTZ, A., FAY, A., BARTH, M., e MAURMAIER, M. **Orchestration vs. Choreography Functional Association for Future Automation Systems**. IFAC-PapersOnLine, 53(2), 8268-827, 2020.
- TAHA, **Lecture Notes on Cyber-Physical Systems**. Disponível em: <https://bit.ly/LNCPS-2018>, 2018. Acesso em: 13/02/2020.

- THÖNES, J. **Microservices**. IEEE SOFTWARE, 32(1), 116-116, 2015.
- WANG, X., WEI, H., CHEN, N., HE, X. e TIAN, Z. **An Observational Process Ontology-Based Modeling Approach for Water Quality Monitoring**. Water, vol.12, num.3, p.715. 2020.
- WEBER, C., KÖNIGSBERGER, J., KASSNER, L., e MITSCHANG, B. **M2DDM—a maturity model for data-driven manufacturing**. Procedia Cirp, 63, 173-178, 2017.
- WIESNER, A., MORBACH, J., YANG, A., BAYER, B., MARQUARDT, W., **Chemical Process Systems**, Technical Report LPT-2008-29, 2008.
- WOLF, J. A. **The experience era is upon us**. Em: Patient Experience Journal, v. 3, n. 2, p. 1-4, 2016.
- YAN, M.; RICKER, N. L. **Multi-objective control of the Tennessee Eastman challenge process**. Em: Proceedings of American Control Conference-ACC'95. IEEE, 1995. p. 245-249, 1995.
- YE, N., MCAVOY, T. J., KOSANOVICH, K. A., e PIOVOSO, M. J. **Plant-wide control using an inferential approach**. Em: 1993 American Control Conference (pp. 1900-1904). IEEE, 1993.
- ZHANG, J. **Integrated batch-to-batch control and within batch control of batch processes using neural network models**. Em: Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2004, p. 114-119, 2004.
- ZHOU, K., LIU, T., & ZHOU, L. **Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges**. Em: 12th International conference on fuzzy systems and knowledge discovery (FSKD) (pp. 2147-2152). IEEE, 2015.
- ZOSS L.M. **Applied Instrumentation in the Process Industries**. Gulf Publ., 1979.
- ZELLER, V., HOCKEN, C., STICH, V. **Acatech Industrie 4.0 Maturity Index – A Multidimensional Maturity Model** IFIP International Federation for Information Processing. Em: Springer Nature Switzerland, pp. 105–113, 2018

9 APÊNDICE A – ALGORITMOS PARA ORQUESTRAÇÃO E COREOGRAFIA

Algoritmo 0 - Operação de Batelada

// batch op service

Input: HS151A, HS151B, HS151F, HS151H, HS151I, LSL151, LSH151, LSHH151, TT151, TT_SP, FQS151, FQS151_SP, ZSL151D, ZSL151E

get_status_from (reset_and_start)

if status == 1

 trigger (fill_reactor)

 if status ==1

 trigger (starts_agit)

 if status ==1

 trigger(controls_temperature)

 if status ==1

 trigger (drain_reactor)

 end

 end

 end

end

Algoritmo 1 - Reset e Inicia Operação

// reset_and_start service

Input: HS151A, HS151B, HS151F, HS151H, HS151I, LSL151, LSH151, LSHH151, TT151, TT_SP, FQS151, FQS151_SP, ZSL151D, ZSL151E

function RESET_AND_START (HS151A)

If HS151A == 1

 then 1CR ==1

 While 1CR == 1

 if LSL151 == 1

 ZSL151E == 1

 ZSL151D== 1

 FQS151 == 1

 // SE COREOGRAFIA

```

        fill_reactor(HS151B, LSL151, ZSL151D, ZSL151E, FQS151)
// trigger da função de enchimento do reator

        // SE ORQUESTRAÇÃO

        status == 1 // 1 para OK e 0 para não OK
        send_status_value_to (status, batch_operation)

    else

        ZSL151E == 0
        ZSL151D == 1
        FQS151 == 1

    end if

    if HS151A == 0

        then 1CR == 0

    end if

end while
end if

```

Algoritmo 3 - Alarma quando o nível do reator está muito alto // level_high_high_alarm service

Input: HS151A, HS151B, HS151F, HS151H, HS151I, LSL151, LSH151, LSHH151, TT151, TT_SP, FQS151, FQS151_SP, ZSL151D, ZSL151E

function HIGH_HIGH_ALARM (level_value, LSH151, HS151F)

```

If HS151F == 1

    if LSHH151 == 1

        5CR == 1
        HY151C == 0
        HY151D == 0
        HS151G == 1
        6CR == 1
    end if
end if

```

Algoritmo 4 - Começa Agitação // starts_agit service

Input: HS151A, HS151B, HS151F, HS151H, HS151I, LSL151, LSH151, LSHH151, TT151, TT_SP, FQS151, FQS151_SP, ZSL151D, ZSL151E

function STARTS_AGIT (HS151H, HS151I)

```

If HS151H == 1 // acionamento manual do agitador

```

```

    4M == 1
    7CR == 1
    TD1 == 1

```

// SE COREOGRAFIA

controls_temperature(HS151, TT151, tempo_ciclo)

// SE ORQUESTRAÇÃO

status == 1

// 1 para OK e 0 para não OK

send_status_value_to (status, batch_operation)

else

4M == 0

7CR == 0

if HS151I == 1

8CR == 1

TD1 == 0

end if

end if

Algoritmo 5 - Controla a temperatura

// controls_temperature service

Input: HS151A, HS151B, HS151F, HS151H, HS151I, LSL151, LSH151, LSHH151, TT151, TT_SP, FQS151, FQS151_SP, ZSL151D, ZSL151E

function CONTROLS_TEMPERATURE (HS151, TT151, tempo_ciclo)

If HS151 == 1

if 12CR == 1 and 7CR == 0

9CR == 1

HY151A == 1

HY151B == 1

KT151A == 0

KT151B == 0

LS1 == 0

LS2 == 0

LS3 == 1

1M == 1

TSP= 50

FUNCTION_KT151 (0,1* tempo_ciclo, TT151, TP_SP) // rampa temperatura para 50

graus celsius de 0 até 10% de ciclo

LS1 == 1

KT151A == 1

2M == 1

10CR == 1

wait (0,1*tempo_ciclo)

// hold temperatura em 50

graus celsius de 10% até 20% ciclo

LS1 == 0

KT151A == 0

2M == 0

10CR == 0

TSP= 80

```

        FUNCTION_KT151 (0,15* tempo_ciclo, TT151, TP_SP) // rampa temperatura para 80
    graus celsius de 20 até 35% do ciclo
        LS2 == 1
        KT151B == 1
        3M == 1
        11CR == 1
        wait (0,3*tempo_ciclo) // hold temperatura em 80
    graus celsius de 35% até 65% ciclo
        LS2 == 0
        KT151B == 0
        3M == 0
        11CR == 0
        TSP= 20
        FUNCTION_KT151 (0,35* tempo_ciclo, TT151, TP_SP) // rampa temperatura para 20
    graus celsius de 65% até 100% do ciclo      LS3 == 0
        12CR == 1
        9CR == 0

// SE COREOGRAFIA

        drain_reactor ()

// SE ORQUESTRAÇÃO

    status == 1 // 1 para OK e 0 para não OK
    send_status_value_to (status, batch_operation)

end if

```

Algoritmo 6 - Drena o Reator**// drain_reactor service**

Input: HS151A, HS151B, HS151F, HS151H, HS151I, LSL151, LSH151, LSHH151, TT151, TT_SP, FQS151, FQS151_SP, ZSL151D, ZSL151E

```
function DRAIN_REACTOR (HS151, TT151, tempo_ciclo)
```

```
If HS151J
```

```
ZSL151C == 0
```

```
ZSL151D == 0
```

```
7CR == 0
```

```
13CR == 1
```

```
while LSL151 == 0
```

```
14CR == 0
```

```
HY151E == 1
```

```
end while
```

```
14CR == 1
```

```
HY151E == 0
```

```
13CR == 0
```

// SE COREOGRAFIA

```
reset_and_start (HS151A)
```

```
// SE ORQUESTRAÇÃO
```

```
status == 1 // 1 para OK e 0 para não OK  
send_status_value_to (status, batch_operation)
```

```
end if
```

10 APÊNDICE B – SIMULANDO INTEGRAÇÃO CIBERFÍSICA

A seguir, é descrita uma sequência de passos para integrar softwares a fim de ilustrar uma integração ciberfísica. Os programas utilizados são: Aspen, Osisoft (historiador) e Matlab.

A simulação se divide nas seguintes etapas:

- a. Simulação no Aspen *Plus*
- b. Simulação no Aspen *Dynamics*
- c. Configuração do Servidor OPC
- d. Integração com o PI System Matlab
- e. Criação de Módulos de Análise no Matlab

Na Figura 33, é representado um diagrama de comunicação entre os programas.



Figura 33: Comunicação entre softwares

As simulações estão sendo realizadas em uma *workstation* com *Windows Server*®, onde estão instalados todos os programas descritos a seguir. Apesar desta não ser a arquitetura de informação recomendada para fins industriais (servidor, *data archive* e ferramentas de visualização de dados na mesma máquina), ela é considerada adequada para os fins representativos das simulações para o trabalho de dissertação.

A seguir, são descritas detalhadamente as etapas para que o sistema de comunicação de um ambiente industrial seja simulado.

Matrikon OPC

O *Matrikon OPC Server for Simulation* é um programa de livre acesso e serve para simular o servidor OPC DA (*OLE for Process Control Data Access*) do sistema. Através dele, é possível enviar os dados das variáveis de processo para a ferramenta cliente (*PI OPC Client*), onde o servidor OPC será identificado e as etiquetas de monitoramento de variáveis (*tags*) serão rastreadas.

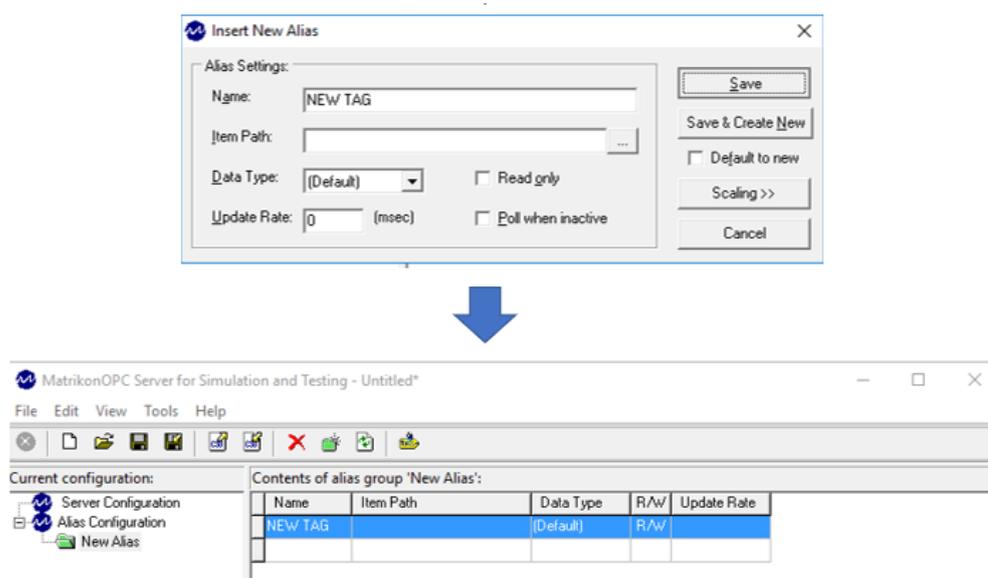


Figura 34: Tela do Matrikon OPC Server para Criação de Nova Tag.

Simulação em Aspen *Plus* e *Dynamics*

Os softwares Aspen *Plus* e Aspen *Plus Dynamics* têm o objetivo de simular a parte física de um processo industrial, onde serão simuladas as operações unitárias e reações para cada um dos processos propostos (reator batelada e processo contínuo TE). O sistema gera variáveis de processo que serão enviadas em tempo real para outras camadas de informação.

No Aspen *Plus*, são construídas as simulações em estado estacionário, onde serão gerados os dados que servirão como base para a simulação em modo dinâmico.

A depender do método de convergência desejado, é possível realizar a simulação em dois diferentes modos no Aspen *Dynamics*, são eles: “*pressure*

driven”, onde as taxas de fluxo são determinadas pela relação pressão/fluxo entre os blocos *upstream* e *downstream* e o “*flow driven*”, permitindo que sejam feitas alterações de fluxo nas correntes assumindo fluxo e controle de pressão ideais.

Após a geração dos resultados em estado estacionário, realiza-se a transferência para o modo dinâmico, onde são feitas as adições de dimensão de equipamentos, fazendo com que as informações sobre as variáveis de processo sejam geradas e transmitidas para os softwares de gerenciamento e interpretação de dados, através da ferramenta “*On line Links*”.

Ao utilizar a ferramenta *On Line Links* do Aspen, é possível associar os valores de simulação às etiquetas de monitoramento de processo (*tags*) criadas, conforme é mostrado pela Figura 35, a seguir.

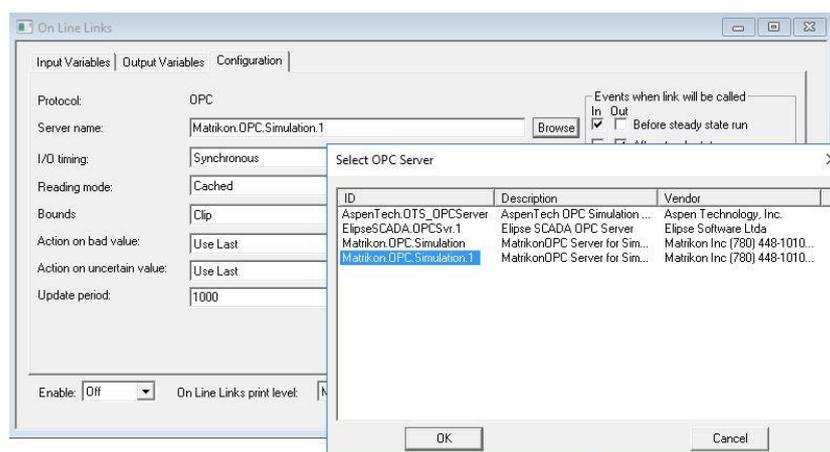


Figura 35: Identificação de Servidor na Ferramenta *Online Links*.

PI System

O PI System é um sistema do tipo PIMS (*Plant Integration Management System*), ou seja, adquire dados de processo de diversas fontes e os armazena em um banco de dados históricos, disponibilizando-os em diferentes formas de apresentação final. Isso resolve o problema de fragmentação de dados e proporciona uma visão unificada do processo, em que pode ser realizado o acompanhamento de processos em tempo real e analisar os dados arquivados no sistema.

Os dados são adquiridos através de interfaces do *Windows* e enviados para o servidor com as ferramentas do *software*. Em seguida, é possível usar ferramentas de visualização e análise de dados integrando com outros softwares de *business intelligence* ou usando as suas próprias ferramentas (como o *Data Link*, *Process Book* e *PI Vision*).

O conjunto de softwares oferece infraestrutura para a coleta, armazenamento, rastreamento, análise, devolução e visualização de dados. A Figura 36 explica estrutura típica de um *PI System* completo.

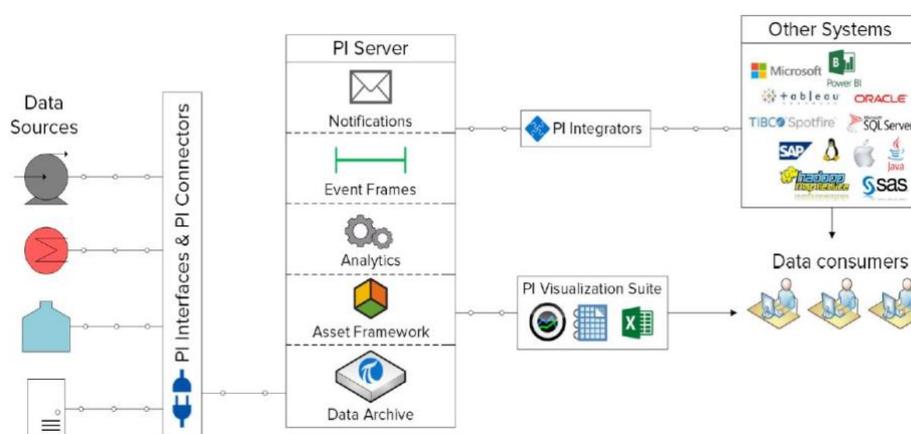


Figura 36: Componentes de um *PI System* e suas ferramentas.

Através do *PI System*, é possível enviar os dados das variáveis de processo para a ferramenta cliente (*PI OPC Client*), que enviará os dados para o sistema de gerenciamento de dados (*PI System Management Tools*).

Para a realização da simulação, são necessários o *PI SDK*, onde é realizada a conexão com o *Data Archive* (arquivo de dados), o *PI OPC Client Tool*, a fim de identificar o servidor e buscar as *tags* que foram criadas no Matrikon *OPC server* e o *PI Interface Configuration Utility (ICU)*, para que a interface com o servidor *OPC* seja criada e registre os valores nas *tags* no arquivo.

Em seguida, as *tags* são criadas usando o *PI SMT*. Nele, serão construídas dadas características para os pontos criados como *tags*. Exemplos de características de tag são: configuração de algoritmos de exceção e compressão, a fim de evitar o excesso de informações no *hard disk (HD)*, definição do intervalo

de tempo a coleta será realizada (*pooled ou advise*) e registro de onde a *tag* está sendo coletada (no caso, OPC).

Após a criação do ponto (PI *point*), os valores gerados no sistema já conseguem ser monitorados em “*current values*”. Outros valores relacionados a saúde do sistema, também conseguem ser monitorados através da ferramenta.

Com a parte inicial finalizada, é preciso seguir para a etapa de construção das árvores de ativos do sistema. Através do PSE (PI *System Explorer*), é possível monitorar diferentes sistemas ao mesmo tempo, criando diferentes bases de dados. As *tags* criadas, servirão como atributos de um componente do sistema.

Através do PSE, também é possível criar atributos com base em outras referências que não sejam o PI Point, um exemplo é a criação de atributos através de base de dados em SQL.

MATLAB

A aplicação de algoritmos mais complexos de otimização e monitoramento vai além da finalidade do PI *System*, apesar de ser uma ferramenta poderosa para a análise e gerenciamento dos dados dos sistemas.

Para o caso de uso, o Matlab tem apenas a função de captar os dados de processo enviados pelo sistema. Entretanto, o software pode ser usado para uma interpretação mais complexa de dados, onde pode ser realizada, por exemplo, a aplicação de observadores de processo.

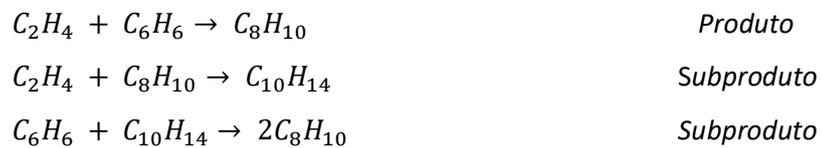
Para realizar a conexão entre o Matlab e a árvore de ativos do sistema, elaborada no PI System Explorer (PSE), foi utilizada uma rotina que busca o valor atual do atributo (ex: temperatura e pressão). A metodologia de integração foi realizada através da ferramenta AF SDK, através dela, o Matlab acessa os dados do PI usando uma biblioteca desenvolvida em .Net.

Aplicação da Integração

O Aspen Plus tem um bloco exclusivo para a simulação de um reator em batelada, o RBatch. Porém, devido as suas limitações para a implementação de controle e *scheduling* no modo dinâmico, foi utilizada outra estratégia para a simulação do sistema de reator batelada proposto por Zoss (1979).

No Aspen *Plus*, foi simulado o bloco de reator perfeitamente agitado (RCSTR) e realizada a sua transferência para o modo dinâmico.

A reação utilizada para os testes iniciais seguiu como o exemplo de Luyben (2007), descrita a seguir:



As taxas de reação em (kmol/(s*m³)) foram configuradas conforme as Equações 3, 4 e 5, a seguir:

$$rr_1 = (1,58 * 10^6) e^{\left(-\frac{71,16 * 10^3}{RT}\right)} [C_2H_4]^1 [C_6H_6]^1 \quad \text{Equação 1}$$

$$rr_2 = (2,778 * 10^4) e^{\left(-\frac{83,68 * 10^6}{RT}\right)} [C_2H_4]^1 [C_8H_{10}]^1 \quad \text{Equação 2}$$

$$rr_3 = (0,4167) e^{\left(-\frac{62,76 * 10^6}{RT}\right)} [C_{10}H_{14}]^1 [C_6H_6]^1 \quad \text{Equação 3}$$

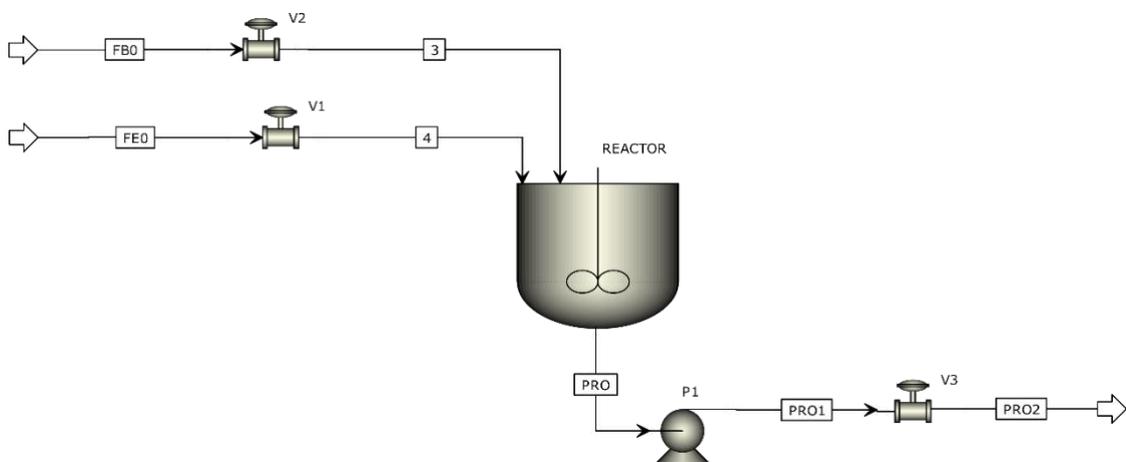


Figura 37: Fluxograma do Reator no Aspen *Plus*.

Tabela 4 - Resultados da Reação no Aspen Plus em Frações Molares (Adaptado de: LUYBEN, 2007).

COMPONENTE	ALIMENTAÇÃO DE BENZENO	ALIMENTAÇÃO DE ETILENO	PRODUTO
E	0	1	0,0169998
B	1	0	0,50874
EB	0	0	0,47402
DEB	0	0	0,000240091

As alimentações de benzeno e etileno foram configuradas como descreve Luyben (2007), sendo equivalentes a 0,2 kmol/s e 0,4 mol/s, respectivamente. As temperaturas de alimentação foram de 298 K e pressão de 15 atm. As composições e produto de reação são descritos na tabela 4.

Ao transferir a simulação para o modo dinâmico, foi utilizado o modo *pressure driven*, e a configuração das válvulas foi realizada de maneira que as quedas de pressão nas válvulas 1 e 2 fossem equivalentes a 10 bar e, na válvula 3, o valor fosse 3 bar. O diâmetro do reator foi de 10 metros com geometria *flat*.

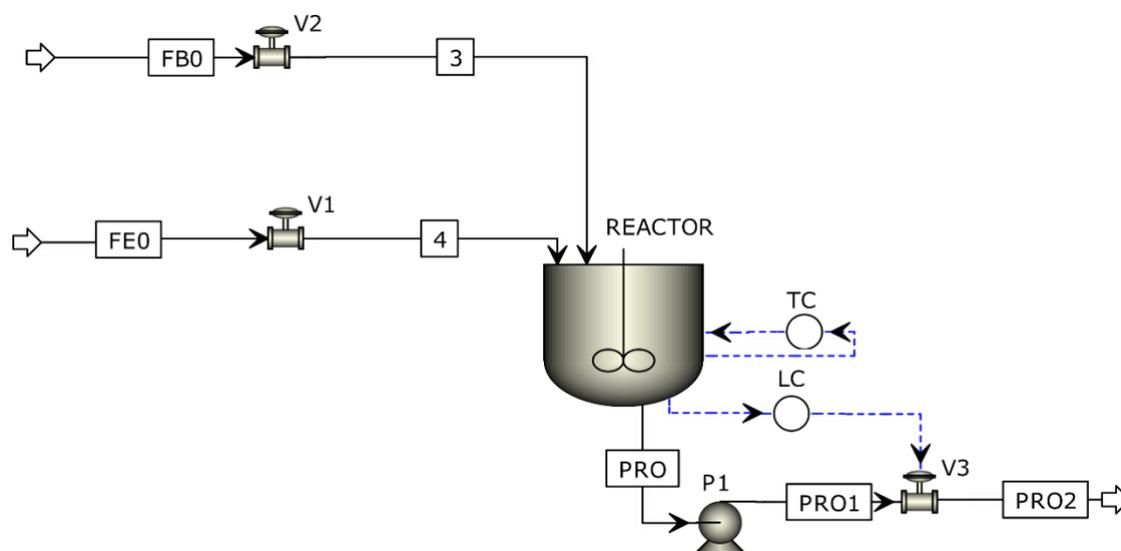


Figura 38: Fluxograma do Reator no Aspen Dynamics.

Foram criadas *tags* para o acompanhamento dos valores de temperatura, pressão e nível no reator. Conforme a Figura 39, abaixo.

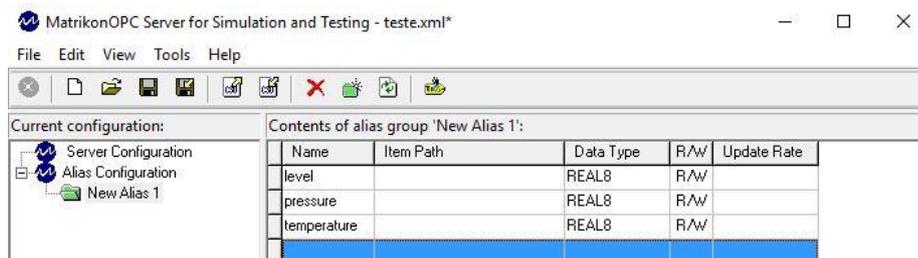


Figura 39: Tags para o Reator Batelada.

Em seguida, são realizadas as configurações para que a *ferramenta On Line Links* (anteriormente descritas) leia os valores referentes as tags de temperatura, nível e pressão do sistema.

Para o reator batelada foram criadas *tags* de temperatura e pressão que, após a configuração do servidor OPC, puderam ser atributos atrelados ao reator na árvore de ativos criada para o sistema.

Tag	Value	Quality	Timestamp	Type	Item ID
Rbatch_L	10.000000	Good - ...	03/27/20 16:48:54	VT_R8	batch.Rbatch_L
Rbatch_P	10.000000	Good - ...	03/27/20 16:48:54	VT_R8	batch.Rbatch_P
Rbatch_T	430.000000	Good - ...	03/27/20 16:48:54	VT_R8	batch.Rbatch_T

Figura 40: Tags do Reator Batelada Configuradas no OPC Client.

Name	Value
Level	10 m
Pressure	10 atm
Temperature	430 K

Figura 41: Monitoramento de Variáveis na Árvore de Ativos do PI System.

Para que os dados presentes no historiador PI System consigam ser lidos e armazenados pelo Matlab, a rotina a seguir deverá ser executada.

```
%% MATLAB ROUTINE TO READ OSISOFTDATA %%
```

```
clear
clc

NET.addAssembly('OSIsoft.AFSDK');
import OSIsoft.AF.*;
import OSIsoft.AF.Asset.*;
import OSIsoft.AF.Time.*;
import OSIsoft.AF.Data.*;
import OSIsoft.AF.PI.*;

% connect to the STCA AF Server

piSystems = OSIsoft.AF.PISystems;

fprintf('Connecting and refreshing\n');

% af_server = piSystems.Item('SERVER'S NAME');

af_server = piSystems.Item('WIN-170L4Q5U2AH');

% af_database = af_server.Databases.Item('DATABASE'S NAME');

af_database = af_server.Databases.Item('BATCH');

% make sure you have the latest database

af_database.Refresh();
fprintf('Connected\n');

% get a test element
%NOTE: this assumes that \Test\Test1\TestTag exists in the hierarchy

testAttribute1 = af_database.Elements.Item('Reactor
Plant').Elements.Item('RBatch').Attributes.Item('Temperature');

testAttribute2 = af_database.Elements.Item('Reactor
Plant').Elements.Item('RBatch').Attributes.Item('Pressure');

testAttribute3 = af_database.Elements.Item('Reactor
Plant').Elements.Item('RBatch').Attributes.Item('Level');

% Get current value data from PSE attributes

af_database.Refresh();

curVal1 = testAttribute1.GetValue()
curVal2 = testAttribute2.GetValue()
curVal3 = testAttribute3.GetValue()

af_database.ApplyChanges();

af_database.CheckIn();

fprintf('The value of %s is %f at %s \n', char(testAttribute1.Name),
curVal1.Value, char(curVal1.Timestamp.LocalDateTime.ToString()));
```