UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

EDUARDO DE SENZI ZANCUL

**Concepção, implantação e aplicação de uma Fábrica de Aprendizagem
voltada para a Indústria 4.0**

São Paulo

2021

EDUARDO DE SENZI ZANCUL

**Concepção, implantação e aplicação de uma Fábrica de Aprendizagem
voltada para a Indústria 4.0**

Versão Original

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo como parte dos
requisitos para obtenção do
título de Livre Docente.

Área: Qualidade e Engenharia do
Produto.

São Paulo

2021

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.

Catálogo na publicação

Biblioteca

Escola Politécnica

Zancul, Eduardo de Senzi

Concepção, implantação e aplicação de uma Fábrica de Aprendizagem voltada para a Indústria 4.0 / E. S. Zancul -- São Paulo, 2021.
113 p.

Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1.Fábrica de aprendizagem 2.Demonstrador 3.Indústria 4.0 4.Learning Factory I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II.t.

ZANCUL, E. S. **Concepção, implantação e aplicação de uma Fábrica de Aprendizagem voltada para a Indústria 4.0.** Monografia (Livre Docência em Engenharia de Produção) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

Aprovado em:

Banca examinadora

Prof(a). Dr(a).: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof(a). Dr(a).: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof(a). Dr(a).: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof(a). Dr(a).: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof(a). Dr(a).: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

*Dedico este trabalho aos meus três amores,
Luciana, Henrique e Bruno*

AGRADECIMENTOS

À Universidade de São Paulo, por prover as condições para que o laboratório Fábrica do Futuro pudesse se tornar realidade.

Às agências e instituições de fomento – ABDI, CAPES, CNPq, Amigos da POLI –, pelo significativo apoio ao projeto da Fábrica do Futuro.

A todas as empresas e instituições parceiras da Fábrica do Futuro, por investirem na relação Universidade-empresa.

Aos profissionais das empresas e instituições parceiras, pela colaboração no projeto.

Aos pesquisadores e pesquisadoras de pós-graduação do nosso grupo de pesquisa. Meu profundo agradecimento, em especial às pessoas que atuaram diretamente no projeto: Lorena Fernandes Leal, Luiz Durão, Marcelo Grotti, Mariana Soares de Oliveira, Pedro Romeral.

Às alunas e aos alunos de graduação que contribuíram com a realização do projeto, em especial aos bolsistas e aos estudantes que realizaram Iniciação Científica e Trabalho de Formatura na Fábrica do Futuro.

Aos professores e professoras que participaram diretamente da jornada de implantação da Fábrica do Futuro, em especial Prof. Carlos Magno de Oliveira Valente, Prof. Davi Nakano, Prof. Klaus Schützer e Profa. Roseli de Deus Lopes.

Aos professores e professoras que aceitaram o desafio de utilizar a Fábrica do Futuro em suas disciplinas, meu muito obrigado.

À gestão do InovaUSP, por abrigar o projeto e por todo o apoio: Prof. Fabio Cozman, Prof. Luiz Henrique Catalani, Peter Greiner e Terezinha Lopes Lira.

Aos colegas professores, funcionárias e funcionários do Departamento de Engenharia de Produção e à administração da Escola Politécnica, pelo companheirismo em todos os momentos e inestimável suporte.

Ao Prof. Henrique Rozenfeld, pela inspiração visionária da Fábrica Integrada Modelo (FIM), que influenciou significativamente este trabalho.

À Maria Teresa Mhereb e à Luciana Carvalho Fonseca, pela cuidadosa revisão do texto.

RESUMO

ZANCUL, E. S. **Concepção, implantação e aplicação de uma Fábrica de Aprendizagem voltada para a Indústria 4.0.** Monografia (Livre Docência em Engenharia de Produção) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

O setor de manufatura está passando por rápida e profunda evolução em decorrência da adoção crescente de tecnologias digitais associadas à Indústria 4.0. A evolução acelerada amplia a demanda da indústria por mão de obra qualificada e por instrumentos que apoiem a avaliação de novas tecnologias. A fim de lidar com essas demandas, vários países têm fomentado a estruturação de demonstradores tecnológicos de Indústria 4.0. Fábricas de Aprendizagem (*Learning Factories*) são um tipo de demonstrador com foco primordial na formação de pessoal e com possibilidade de aplicação em projetos de pesquisa e inovação. Esse tipo de infraestrutura ainda é pouco difundido no Brasil. Este trabalho tem como objetivo conceber, implantar e aplicar na Universidade de São Paulo uma Fábrica de Aprendizagem voltada para a Indústria 4.0, denominada Fábrica do Futuro. Os resultados obtidos incluem o estabelecimento da Fábrica do Futuro seguindo a fundamentação teórica na área. A Fábrica do Futuro foi aplicada no ensino de graduação, de pós-graduação e na capacitação profissional. Na pesquisa, a Fábrica do Futuro foi utilizada como infraestrutura em trabalhos sobre Manufatura Aditiva e *Digital Twin*. Estudos sobre o processo adotado para a implantação da Fábrica do Futuro permitiram expandir a compreensão da literatura sobre as fases de implantação de uma Fábrica de Aprendizagem. Um modelo de relacionamento com empresas foi estabelecido, permitindo o desenvolvimento de provas de conceito conforme demandas reais da indústria. A partir dos resultados obtidos, os principais desafios são a perenização da infraestrutura e a ampliação de seu uso. Os resultados atingidos indicam oportunidade de pesquisas futuras para mensurar a efetividade das práticas didáticas adotadas e para refinar a conceituação teórica sobre provas de conceito de Indústria 4.0 a partir da compreensão gerada na Fábrica do Futuro.

Palavras-chave: Fábrica de aprendizagem. Demonstrador. Indústria 4.0.

ABSTRACT

ZANCUL, E. S. **Concepção, implantação e aplicação de uma Fábrica de Aprendizagem voltada para a Indústria 4.0.** Monografia (Livre Docência em Engenharia de Produção) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

The manufacturing sector is evolving rapidly and profoundly due to the growing adoption of digital technologies related to Industry 4.0. This process increases the industry's demand for a highly qualified workforce. At the same time, there is a need for novel instruments to support technologies' assessment. Therefore, several countries have been investing in Industry 4.0 technology demonstrators. Learning Factories may be considered a type of demonstrator with a primary focus on education and extended application in research and innovation projects. Learning Factories are still not widespread in Brazil. This work aims to conceive, implement and apply in the University of São Paulo a Learning Factory focused on Industry 4.0, called Fábrica do Futuro. This work's results include establishing the Fábrica do Futuro following the theoretical foundation in the area. Fábrica do Futuro was applied in undergraduate, graduate, and professional training. Fábrica do Futuro was also used as infrastructure in research on Additive Manufacturing and Digital Twin. The process followed for implementing Fabrica do Futuro allowed to expand the literature understanding about the implantation phases of a Learning Factory. A relationship program with the industry was established, supporting the development of Industry 4.0 proofs of concept (POCs) according to real industry demands. Based on the results obtained, the main challenges are expanding the Fabrica do Futuro usage and maintaining its infrastructure. The results achieved indicate interesting avenues for further research to measure the effectiveness of the didactic practices adopted and to refine the theoretical conceptualization of Industry 4.0 proofs of concept based on the understanding generated by the Fábrica do Futuro developments.

Keywords: Learning Factory. Demonstrator. Industry 4.0.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – As quatro revoluções industriais _____	24
Figura 2 – Principais motivadores para a Indústria 4.0 _____	27
Figura 3 – Principais tecnologias de Indústria 4.0 _____	29
Figura 4 – <i>Framework</i> de tecnologias de Indústria 4.0 e estágios de aplicação _____	30
Figura 5 – Dimensões de um <i>Digital Twin</i> _____	32
Figura 6 – Exemplos de iniciativas nacionais para o desenvolvimento da manufatura _____	33
Figura 7 – Classificação de Fábricas de Aprendizagem em sentido estrito e sentido lato _____	38
Figura 8 – Referências internacionais de Fábricas de Aprendizagem _____	40
Figura 9 – Morfologia de Fábricas de Aprendizagem – exemplo dimensão de Estrutura _____	41
Figura 10 – Abordagem de projeto de Fábricas de Aprendizagem _____	42
Figura 11 – Cronologia dos projetos e apoios para a implantação da Fábrica do Futuro _____	45
Figura 12 – Evolução do espaço físico da Fábrica do Futuro _____	47
Figura 13 – Produto-exemplo da Fábrica do Futuro _____	52
Figura 14 – Morfologia de Fábricas de Aprendizagem – dimensão de Produto _____	52
Figura 15 – Processo de desenvolvimento de POCs de Indústria 4.0 da disciplina 0303410 _____	59
Figura 16 – Classificação da Fábrica do Futuro conforme Morfologia de Fábricas de Aprendizagem _____	65
Figura 17 – Configurador de produtos da Fábrica do Futuro _____	67
Figura 18 – Produto conectado da Fábrica do Futuro _____	68
Figura 19 – Layout da Fábrica do Futuro _____	70
Figura 20 – Visão geral da linha de montagem de skates da Fábrica do Futuro _____	71
Figura 21 – Máquinas na área de Manufatura Aditiva da Fábrica do Futuro _____	72
Figura 22 – Esteira separadora empregando visão computacional na Fábrica do Futuro _____	73
Figura 23 – Sala de aula na Fábrica do Futuro _____	74
Figura 24 – Sistemas de informação da Fábrica do Futuro no ciclo de vida de produtos _____	76
Figura 25 – Atividades do demonstrador integrado da Fábrica do Futuro _____	77
Figura 26 – Controle de qualidade de montagem customizada de rodas _____	78
Figura 27 – Produção de componentes opcionais em Manufatura Aditiva _____	79
Figura 28 – Tecnologias de Indústria 4.0 empregadas na Fábrica do Futuro conforme modelo de Frank, Dalenogare e Ayala (2019) _____	80
Figura 29 – Atividades de ensino na Fábrica do Futuro _____	83
Figura 30 – Estrutura do curso de capacitação para profissionais de indústria _____	84
Figura 31 – Estrutura do curso de imersão <i>in company</i> _____	87
Figura 32 – Emprego da Fábrica do Futuro em outras atividades didáticas _____	88

Figura 33 – Modelo de produção distribuída empregando Manufatura Aditiva	89
Figura 34 – Modelo de <i>Digital Twin</i>	90
Figura 35 – Aplicação do modelo de <i>Digital Twin</i> na Fábrica do Futuro	91
Figura 36 – Detalhamento da integração entre visão computacional e MES	94
Figura 37 – Exemplos de POCs	95
Figura 38 – Eventos da indústria na Fábrica do Futuro	96
Figura 39 – Classificação da Fábrica do Futuro conforme Morfologia de Fábricas de Aprendizagem – dimensão de Modelo Operacional	107
Figura 40 – Classificação da Fábrica do Futuro conforme Morfologia de Fábricas de Aprendizagem – dimensão de Propósito e objetivos	108
Figura 41 – Classificação da Fábrica do Futuro conforme Morfologia de Fábricas de Aprendizagem – dimensão de Processo	109
Figura 42 – Classificação da Fábrica do Futuro conforme Morfologia de Fábricas de Aprendizagem – dimensão de Estrutura	110
Figura 43 – Classificação da Fábrica do Futuro conforme Morfologia de Fábricas de Aprendizagem – dimensão de Produto	111
Figura 44 – Classificação da Fábrica do Futuro conforme Morfologia de Fábricas de Aprendizagem – dimensão de Didática	112
Figura 45 – Classificação da Fábrica do Futuro conforme Morfologia de Fábricas de Aprendizagem – dimensão de Métricas	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais materiais empregados na Fábrica do Futuro _____	53
Tabela 2 – Fases de implantação da Fábrica do Futuro _____	61
Tabela 3 – Disciplinas de graduação e de pós-graduação usuárias da Fábrica do Futuro _____	81
Tabela 4 – Oferecimentos do curso de capacitação e número de participantes concluintes _____	84
Tabela 5 – Avaliação do curso de capacitação de curta duração (% dos respondentes, n = 65) _____	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABII	Associação Brasileira de Internet Industrial
acatech	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
ADITEC	Aachener Demonstrationslabor für integrierte Produktionstechnik
AdP	Amigos da POLI
API	Application Programming Interface
AR	Realidade Aumentada
BCG	Boston Consulting Group
BITKOM	Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V.
BRAGECRIM	Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
Câmara I4.0	Câmara Brasileira da Indústria 4.0
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CFR	Continuous Fiber Reinforcement
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CiP	Center for industrial Productivity
CIRP	Academia Internacional de Engenharia de Produção
CLF	Conference on Learning Factories
CLPs	Controladores Lógicos Programáveis
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CRM	Customer Relationship Management
DCNs	Diretrizes Curriculares Nacionais
DFGN	Design Factory Global Network
DiK	Datenverarbeitung in der Konstruktion
DT	Digital Twin
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
ERP	Enterprise Resource Planning
FDM	Fused Deposition Modeling
FIM	Fábrica Integrada Modelo
GT	Grupo de Trabalho
IALF	International Association of Learning Factories
IELF	Initiative on European Learning Factories

IES	Instituições de Ensino Superior
IIoT	Industrial Internet of Things
ILF	Intelligent Learning Factory
InovaUSP	Centro de Inovação da USP
INSPER	Instituto de Ensino e Pesquisa
IoT	Internet das Coisas
MES	Manufacturing Execution System
NNMI	National Network of Manufacturing Innovation
ONG	Organização Não Governamental
P&DI	Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
PCP	Planejamento e Controle da Produção
PET	Programa Especial de Treinamento
PLM	Product Lifecycle Management
POC	Prova de Conceito
PSS	Sistemas Produto-Serviço
PUB	Programa Unificado de Bolsas
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SCoPE	Smart Components within Smart Production Processes and Environments
SCPM	Laboratório de Sistemas Computacionais para Projeto e Manufatura
SIMTech	Singapore Institute of Manufacturing Technology
TI	Tecnologia da Informação
TU	Universidade Técnica
UNIMEP	Universidade Metodista de Piracicaba
USP	Universidade de São Paulo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VDI Brasil	Associação de Engenheiros Brasil-Alemanha
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
VR	Realidade Virtual
WZL	Werkzeugmaschinenlabor
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1.	JUSTIFICATIVAS	17
1.2.	OBJETIVO	21
1.3.	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	22
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1.	INDÚSTRIA 4.0	23
2.1.1.	<i>Definição de Indústria 4.0</i>	23
2.1.2.	<i>Motivadores para a Indústria 4.0</i>	26
2.1.3.	<i>Tecnologias de Indústria 4.0</i>	28
2.1.4.	<i>Iniciativas dos países para Indústria 4.0 e o papel dos demonstradores</i>	32
2.2.	FÁBRICAS DE APRENDIZAGEM	34
2.2.1.	<i>Evolução e definição de Fábricas de Aprendizagem</i>	35
2.2.2.	<i>Referências de Fábricas de Aprendizagem</i>	39
2.2.3.	<i>Dimensões e Morfologia de Fábricas de Aprendizagem</i>	40
2.2.4.	<i>Projeto de Fábricas de Aprendizagem</i>	41
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1.	CRONOLOGIA DOS PROJETOS DE FOMENTO	44
3.2.	EQUIPE DE COLABORADORES	48
3.3.	PROJETO E IMPLANTAÇÃO DA FÁBRICA DE APRENDIZAGEM	50
3.3.1.	<i>Definição e implantação da infraestrutura sociotécnica</i>	50
3.3.1.1.	<i>Definição do produto-exemplo</i>	51
3.3.1.2.	<i>Materiais: máquinas e equipamentos</i>	52
3.3.1.3.	<i>Definição do layout</i>	54
3.3.2.	<i>Definição e implantação da infraestrutura para a didática</i>	55
3.3.2.1.	<i>Identificação de disciplinas usuárias e proposição de métodos para o ensino</i>	55
3.3.2.2.	<i>Método de ensino de design em projetos de inovação em parceria com empresas</i>	56
3.4.	CARACTERIZAÇÃO DAS FASES DE IMPLANTAÇÃO	60
4.	RESULTADOS	64
4.1.	INFRAESTRUTURA DA FÁBRICA DO FUTURO	64
4.1.1.	<i>Caracterização da Fábrica do Futuro</i>	64
4.1.2.	<i>Configurador e conectividade do produto-exemplo da Fábrica do Futuro</i>	66
4.1.3.	<i>Infraestrutura física da Fábrica do Futuro</i>	68
4.1.3.1.	<i>Linha de montagem</i>	71
4.1.3.2.	<i>Área de Manufatura Aditiva</i>	72

4.1.3.3.	Linha de desmontagem e esteira separadora	73
4.1.3.4.	Sala de aula	73
4.1.3.5.	Áreas de escritório de engenharia	74
4.1.3.6.	Áreas auxiliares – sala de prototipagem, almoxarifado, casa de máquinas	74
4.1.4.	<i>Infraestrutura de sistemas de informação da Fábrica do Futuro</i>	75
4.1.5.	<i>Demonstrador integrado da Fábrica do Futuro</i>	76
4.2.	RESULTADOS NO ENSINO – GRADUAÇÃO, PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO	80
4.2.1.	<i>Aplicação da Fábrica do Futuro em disciplinas de graduação e de pós-graduação</i>	81
4.2.2.	<i>Capacitação de profissionais da indústria</i>	83
4.2.3.	<i>Outras aplicações didáticas da Fábrica do Futuro</i>	87
4.3.	RESULTADOS DE PESQUISA	88
4.3.1.	<i>Fábrica do Futuro como instalação de pesquisa</i>	88
4.3.1.1.	Modelo para a produção distribuída empregando Manufatura Aditiva	88
4.3.1.2.	Modelo de <i>Digital Twin</i> para a gestão do ciclo de vida	89
4.3.2.	<i>Fábrica do Futuro como objeto de pesquisa</i>	91
4.4.	RESULTADOS DE INOVAÇÃO	92
4.4.1.	<i>Modelo de relacionamento com empresas</i>	92
4.4.2.	<i>Desenvolvimento tecnológico de soluções para a Indústria 4.0</i>	93
4.4.2.1.	Integração entre soluções de visão computacional e MES	93
4.4.2.2.	Desenvolvimento de provas de conceito	94
4.5.	RESULTADOS DE DIVULGAÇÃO	95
5.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
5.1.	CONCLUSÕES DO TRABALHO REALIZADO	97
5.2.	IMPLICAÇÕES PARA A PRÁTICA, PARA A PESQUISA E PARA O ENSINO	98
5.3.	PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS	99
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
	APÊNDICE – MORFOLOGIA DA FÁBRICA DO FUTURO	105

1. INTRODUÇÃO

Esta monografia faz parte do conjunto de documentos requeridos para o Concurso de Livre Docência, conforme Edital EP/Concursos 022-2021 (item IV da relação de documentos para a inscrição). Dentre as opções disponíveis, conforme Edital, optou-se pela elaboração de um “texto que sistematize criticamente a obra do candidato ou parte dela, em português, em formato digital”. Essa opção é justificada pela trajetória do autor na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), que combinou o estabelecimento de infraestrutura laboratorial inédita com a aplicação sistemática dessa infraestrutura para apoiar o ensino, a pesquisa e a inovação, possibilitando a obtenção de em um conjunto relacionado de resultados.

A monografia sistematiza a obra do candidato na área de Manufatura Avançada, mais conhecida atualmente pelo termo “Indústria 4.0”. O período compreendido é de 2015 a 2021. Em 2015, o autor iniciou os esforços para a concepção de uma Fábrica de Aprendizagem (*Learning Factory*), denominada Fábrica do Futuro, voltada para a temática da Indústria 4.0 na Universidade de São Paulo (USP). A implantação da Fábrica do Futuro ocorreu em fases, de forma progressiva ao longo dos anos, consolidando-se mais recentemente. Durante o período abrangido pelo trabalho, a Fábrica do Futuro foi aplicada para apoiar disciplinas no ensino de graduação, como infraestrutura para pesquisas de pós-graduação e como ambiente de testes e demonstrações em projetos de inovação em cooperação com empresas. As várias vertentes de aplicação da Fábrica do Futuro são sistematizadas neste documento.

Este capítulo de introdução é organizado em três seções. Inicialmente, são discutidas as justificativas para o trabalho (Seção 1.1). Em seguida, são apresentados os objetivos do trabalho (Seção 1.2). Por fim, é descrita a organização do documento (Seção 1.3).

1.1. JUSTIFICATIVAS

Este trabalho é embasado por quatro justificativas principais: 1) a consolidação da Indústria 4.0 como tendência tecnológica para evolução da manufatura mundialmente; 2) a evolução das abordagens de educação na área de engenharia, com a tendência de adoção de abordagens ativas de ensino e o reforço do ensino prático e aplicado; 3) a carência de ambientes de ensino voltados para a capacitação em Indústria 4.0 no Brasil; 4) a necessidade

de maior disponibilidade de ambientes para testes e demonstrações de tecnologias da Indústria 4.0 no Brasil. Cada uma dessas justificativas é detalhada nos parágrafos a seguir.

Em 2011, o termo “Indústria 4.0” (do alemão *Industrie 4.0*) passou a ser disseminado na Alemanha como referência aos esforços de digitalização e de integração de informações na manufatura (KAGERMANN; LUKAS; WAHLSTER, 2011). Esse movimento ganhou força em 2013, com a publicação, pela acatech (*Deutsche Akademie der Technikwissenschaften* - Academia Alemã de Ciências e Engenharia), de um estudo com recomendações para a implantação da Indústria 4.0 (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013). Em 2013, também foi estabelecida a *Plattform Industrie 4.0* como uma iniciativa para a promoção da Indústria 4.0, estruturada conjuntamente pelas entidades de classe representantes dos setores de máquinas e equipamentos (VDMA¹), de *software*, tecnologia da informação, telecomunicações e internet (BITKOM²) e da indústria eletrotécnica e eletrônica (ZVEI³). Em 2015, a *Plattform Industrie 4.0* foi ampliada com a inclusão de novos atores, com incremento da participação da academia, de sindicatos de trabalhadores e de empresas. A plataforma também teve a sua estrutura reorganizada, passando ser coordenada pelo governo alemão por meio do Ministério da Economia e Energia e do Ministério da Educação e Pesquisa (PLATTFORM ..., 2021). Nota-se que a *Plattform Industrie 4.0* foi concebida originalmente como um esforço de digitalização da indústria alemã. Mesmo assim, o que se viu nos anos seguintes foi a consolidação e disseminação do termo Indústria 4.0 mundialmente. Ao mesmo tempo, vários países estabeleceram, em nível nacional, iniciativas análogas à *Plattform Industrie 4.0* visando a aumentar a competitividade da manufatura por meio da digitalização, como a iniciativa chinesa *Made in China 2025* e a iniciativa norte-americana *National Network of Manufacturing Innovation* (NNMI) (ARBIX et al., 2017). Pesquisas e desenvolvimentos em manufatura passaram a ser orientados para lidar com os desafios da Indústria 4.0. Assim, o termo “Indústria 4.0” consolidou-se como o paradigma atual de desenvolvimento tecnológico para a digitalização da manufatura (XU; XU; LI, 2018).

A aceleração do desenvolvimento tecnológico na manufatura traz desafios relevantes para a formação de mão de obra capacitada e atualizada. Nesse sentido, há vários anos observa-se tendência de adoção de abordagens ativas de ensino na área de engenharia, com

¹ Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.

² Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V.

³ Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V.

o ensino baseado em problemas e projetos (DUTSON et al., 1997; GRAAFF; KOLMOS, 2003; HYMAN, 2001; KOLMOS, 1996, 2015; ZANCUL; SOUSA-ZOMER; CAUCHICK-MIGUEL, 2017). No Brasil, essa tendência ganhou maior impulso com a aprovação, em 2019, das novas Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs) do Curso de Graduação em Engenharia, que enfatizam a formação por competências por meio de uma série ações, com grande ênfase para a articulação entre teoria e prática e a realização de projetos multidisciplinares (EDUCAÇÃO, 2019). A implantação das novas DCNs tem movimentado as escolas de engenharia no país com várias iniciativas, como, por exemplo, a atualização dos planos pedagógicos dos cursos e a revisão da infraestrutura laboratorial necessária para lidar com as demandas de ensino-aprendizagem (CNI, 2021).

Apesar da consolidação da Indústria 4.0 como tendência tecnológica na manufatura e dos avanços das novas DCNs do Curso de Graduação em Engenharia, nota-se ainda a carência de ambientes de ensino voltados para a capacitação em Indústria 4.0 no Brasil. A atualização laboratorial é tipicamente um processo complexo e longo nas Instituições de Ensino Superior (IES) no país, que requer a construção de consensos sobre as prioridades, a conceituação de novos ambientes de ensino, a elaboração de projetos executivos e a obtenção de recursos para a sua implantação. Mundialmente e especialmente em países com o setor de manufatura mais desenvolvido, laboratórios que podem ser classificados como Fábricas de Aprendizagem (*Learning Factories*) vêm se consolidando como um recurso relevante para apoiar o ensino de novas tecnologias de produção. Segundo a Enciclopédia CIRP de Engenharia de Produção, uma Fábrica de Aprendizagem em sentido estrito pode ser definida como

um ambiente de aprendizagem especificado por

- processos realistas, incluindo múltiplas estações de trabalho e compreendendo aspectos técnicos e organizacionais;
- uma configuração que pode ser alterada e que se assemelha a uma cadeia de valor real;
- um produto físico sendo produzido; e
- um conceito didático que compreende aprendizado formal, informal e não formal, viabilizado pelas próprias ações dos participantes atuando no laboratório. (ABELE, 2019, p. 1027, tradução minha)

A mesma definição expande o conceito de Fábricas de Aprendizagem em sentido lato para abranger ambientes de aprendizagem que compreendem serviços, cadeias de valor virtual e aprendizado remoto (ABELE, 2019). Três exemplos de Fábricas de Aprendizagem são

o *Center for industrial Productivity* (CiP), na Universidade Técnica (TU) de Darmstadt, na Alemanha, a *Model Factory@SIMTech*, em Singapura, e a *Intelligent Learning Factory* (ILF), na Universidade Purdue, nos Estados Unidos. O estabelecimento de laboratórios que se aproximam de ambientes de produção em universidades não é um fenômeno recente. Outras experiências semelhantes ocorreram no final dos anos 1980 e início dos anos 1990, para apoiar a disseminação das tecnologias de *Computer Integrated Manufacturing* (CIM). A perspectiva histórica de evolução desse tipo de infraestrutura é explorada na revisão bibliográfica no Capítulo 2. A principal diferença do movimento atual em torno de Fábricas de Aprendizagem é o estabelecimento de um arcabouço teórico mais amplo, com pesquisas que vão além das tecnologias aplicadas no ambiente, para explorar a definição de modelos operacionais desses laboratórios e, principalmente, viabilizar a sua aplicação no ensino (ABELE; METTERNICH; TISCH, 2019). Esse movimento tomou maior impulso a partir de 2011, com o estabelecimento de uma série de conferências – *Conference on Learning Factories*, que atingiu a sua décima primeira edição em 2021 – e com a criação de uma associação internacional, inicialmente denominada *Initiative on European Learning Factories* (IELF), renomeada em 2017 como *International Association of Learning Factories* (IALF) (IALF, 2021). Nota-se que desenvolvimento do conceito de Fábricas de Aprendizagem ocorreu nos últimos dez anos, em paralelo com a disseminação dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0.

Por fim, este trabalho também se justifica pela necessidade de maior disponibilidade de ambientes para testes e demonstrações de tecnologias da Indústria 4.0 no Brasil. Em 2016, o autor deste trabalho participou da equipe de um estudo encomendado pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) com o objetivo de contribuir com a definição de diretrizes para o avanço da Indústria 4.0 no Brasil. Os *benchmarks* internacionais realizados no estudo indicaram a proeminência de ambientes de demonstração nas ações de países para a disseminação da Indústria 4.0. Esses ambientes funcionam como espaços para convergência e agregação de esforços de múltiplos atores, muitas vezes em atividades pré-competitivas. Uma das principais recomendações do estudo de 2016 foi a definição de ações para o incremento do número e a ampliação da sofisticação de demonstradores de Indústria 4.0 no Brasil (TONI, 2017). Desde a realização do estudo, algumas ações incentivaram a evolução na quantidade e complexidade de demonstradores de Indústria 4.0 no país. Em 2020, a Câmara Brasileira da Indústria 4.0 (Câmara I4.0) realizou um mapeamento e classificação de demonstradores de Indústria 4.0 em operação no Brasil (BELLUCCI et al., 2020). Fábricas de

Aprendizagem, como a proposta neste trabalho, são consideradas um tipo de demonstrador para Indústria 4.0, pois, além de apoiar a capacitação profissional, a sua infraestrutura serve de suporte para pesquisas e projetos de inovação em cooperação com empresas, viabilizando testes e demonstrações. No mapeamento realizado pela Câmara I4.0, a Fábrica do Futuro proposta neste trabalho é apresentada como referência para a categoria de *Learning Factory* (BELLUCCI et al., 2020, p. 11).

Assim, o presente trabalho é justificado pelas demandas de evolução tecnológica e do ensino de engenharia, bem como pela necessidade de maior disponibilidade de ambientes para apoiar a pesquisa, desenvolvimento e inovação em tecnologias da Indústria 4.0 no Brasil.

1.2. OBJETIVO

O objetivo geral do trabalho é **conceber, implantar e aplicar uma Fábrica de Aprendizagem voltada para a Indústria 4.0** na Universidade de São Paulo.

A partir do objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

1. desenvolver o modelo conceitual da Fábrica de Aprendizagem;
2. obter os recursos e implantar a Fábrica de Aprendizagem na USP;
3. aplicar a Fábrica de Aprendizagem como infraestrutura laboratorial para apoiar o ensino prático de graduação e a capacitação profissional;
4. aplicar a Fábrica de Aprendizagem para apoiar pesquisas e trabalhos de pós-graduação;
5. desenvolver um modelo de relacionamento com empresas;
6. aplicar a Fábrica de Aprendizagem para apoiar o desenvolvimento de provas de conceito de Indústria 4.0 com base em problemas e demandas reais da indústria.

Os seis objetivos específicos abrangem um conjunto de ações coordenadas pelo pesquisador entre 2015 e 2021 e que convergem para o objetivo geral do trabalho. Como resultado, obtiveram-se a atual infraestrutura da Fábrica do Futuro da USP e a sua aplicação no ensino, pesquisa e inovação.

1.3. ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento é estruturado em cinco capítulos. No presente Capítulo 1 (Introdução), são apresentadas as justificativas para o trabalho e os seus objetivos, além da estrutura do documento.

No Capítulo 2 (Revisão Bibliográfica), é apresentada a fundamentação teórica sobre Indústria 4.0 e Fábricas de Aprendizagem.

No Capítulo 3 (Materiais e Métodos), são descritos os materiais utilizados e os métodos empregados ao longo deste trabalho. São apresentados os projetos de pesquisa e desenvolvimento relacionados e as respectivas fontes de fomento. Também é detalhado o papel de colaboradores, como pesquisadores de pós-graduação e profissionais de empresas, na execução da parte prática do trabalho.

No Capítulo 4 (Resultados), são apresentados os resultados obtidos, iniciando com a caracterização do modelo e a descrição da infraestrutura da Fábrica do Futuro. Em seguida, são descritos os resultados de ensino, pesquisa e inovação.

Por fim, no Capítulo 5 (Conclusões e Considerações Finais), são discutidas as conclusões do trabalho, as implicações para a teoria e para a prática e as recomendações de trabalhos futuros na área.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é organizado em duas seções. O capítulo é iniciado com a discussão sobre conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 (Seção 2.1). Em seguida, é explorado o referencial teórico atual sobre Fábricas de Aprendizagem (Seção 2.2).

2.1. INDÚSTRIA 4.0

A disseminação do termo “Indústria 4.0” completa dez anos em 2021, visto que passou a ser amplamente utilizado na Alemanha em 2011 (KAGERMANN; LUKAS; WAHLSTER, 2011). Nesta Seção 2.1, procura-se explorar os aspectos centrais da evolução do conceito, até a sua de compreensão atual. A Seção é iniciada com a discussão da evolução da definição de Indústria 4.0 (Subseção 2.1.1) e dos motivadores para a Indústria 4.0 (Subseção 2.1.2). Em seguida, são apresentados modelos de tecnologias de Indústria 4.0 (Subseção 2.1.3). Por fim, são exploradas iniciativas de países visando ao aumento da competitividade da manufatura por meio da Indústria 4.0 (Subseção 2.1.4).

2.1.1. Definição de Indústria 4.0

A origem do termo “Indústria 4.0”, que se deu em 2011 na Alemanha, faz referência a uma possível quarta revolução industrial contemporânea e em curso, caracterizada pela adoção intensiva de tecnologias da Internet em sistemas ciberfísicos na manufatura (KAGERMANN; LUKAS; WAHLSTER, 2011).

A primeira revolução industrial, ocorrida no final do século XVIII, foi marcada por acentuada evolução tecnológica na manufatura, relacionada com mudanças amplas na natureza e organização do trabalho, resultando em grande aumento de produtividade, com profundas implicações sociais e econômicas (HOBBSAWM, 2001). A segunda revolução industrial, no início do século XX, foi caracterizada pela introdução das linhas de produção com especialização do trabalho, viabilizando a produção em massa de inúmeros bens de consumo. A terceira revolução industrial, a partir dos anos 1970, foi desencadeada pelo avanço da microeletrônica, que possibilitou a automação crescente da manufatura (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013). A chamada quarta revolução industrial, contemporânea, reflete os impactos da adoção das tecnologias da Internet no ambiente

industrial, provendo conectividade e possibilitando a acumulação e a utilização de dados para apoiar a tomada de decisão (Figura 1).

Figura 1 – As quatro revoluções industriais

Fonte: baseada em Kagermann, Wahlster e Helbig (2013); fonte das imagens: Adobe Stock (com licença de uso).

Desde 2011, um número crescente de trabalhos acadêmicos na área de manufatura passou a utilizar a Indústria 4.0 como referência de paradigma tecnológico e de negócios. De forma genérica, a Indústria 4.0 se caracteriza como “a integração inteligente de máquinas e de processos na indústria com suporte de tecnologias da informação e de comunicação” (PLATTFORM ..., 2021, n.p., tradução minha).

Apesar de haver uma visão disseminada sobre o significado geral de Indústria 4.0, o conceito ainda carece de delimitação teórica. Isso resultou em uma profusão de aplicações e em dificuldade de entendimento do construto (CULOT *et al.*, 2020; NOSALSKA *et al.*, 2020). Soma-se o uso de termos análogos, que são empregados com sentido próximo ao do termo Indústria 4.0 para se referir à produção conectada, sendo os mais comuns *Industrial Internet of Things* (IIoT), *Smart Factory* e *Smart Manufacturing*. Apesar das similaridades com Indústria 4.0, esses termos podem ser compreendidos de forma distinta em diferentes contextos ou locais (NOSALSKA *et al.*, 2020).

Historicamente, o termo mais comumente utilizado no contexto hoje abrangido pela Indústria 4.0 é “Manufatura Avançada” (do Inglês *Advanced Manufacturing*), amplamente difundido desde os anos 1980 com o desenvolvimento do *Computer Integrated*

Manufacturing (CIM). Naquela época, o CIM já tinha como direcionamento elementos que são hoje considerados como escopo da Indústria 4.0, como o uso intensivo de Tecnologia da Informação na produção, o foco na integração de informações e de processos e a busca por maior flexibilidade do sistema produtivo (SCHEER, 1994, 1999). Nos anos 1980 e 1990, o CIM foi tratado com grande expectativa pela comunidade acadêmica e pela indústria, mas a sua implantação na prática enfrentou muitas dificuldades tecnológicas. Acredita-se que, atualmente, a adoção da Indústria 4.0 não enfrentará as mesmas barreiras tecnológicas, dado o grande avanço da microeletrônica e das redes de dados nos últimos trinta anos.

Considerando a profusão de termos, trabalhos recentes procuram delimitar a definição conceitual de Indústria 4.0 (CULOT *et al.*, 2020; NOSALSKA *et al.*, 2020). Culot *et al.* (2020) analisaram quase uma centena de definições considerando fontes da academia e também fontes relevantes de fora da academia, como órgãos de governo e consultorias. Cada definição foi detalhada em seus elementos constituintes. Os autores propuseram um *framework* de classificação e analisaram a ocorrência de termos em seis categorias com base em uma codificação: 1. termo; 2. escopo; 3. tecnologias habilitadoras; 4. outros habilitadores; 5. características específicas; 6. resultados esperados. Dentre os termos (categoria 1), Indústria 4.0, adotado como termo de referência neste trabalho, vem sendo a denominação mais utilizada para descrever as iniciativas atuais de evolução tecnológica da manufatura. O escopo (categoria 2) de aplicação é predominantemente no setor de manufatura, como neste trabalho. As principais tecnologias habilitadoras (categoria 3) são caracterizadas por crescente digitalização e conectividade decorrentes da interface físico-digital, de tecnologias de rede e de processamento de dados, com destaque para a Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) e computação em nuvem. Os outros habilitadores (categoria 4) envolvem habilitadores organizacionais e de inovação no modelo de negócios. Dentre as características específicas do fenômeno (categoria 5), os autores identificaram: integração de processos, informações em tempo real, representação virtual da realidade, autonomia, servitização de produtos, servitização das funções da manufatura, capacidade de predição, modularidade e capacidade de reconfiguração. Por fim, dentre os resultados esperados (categoria 6), destaca-se a expectativa de ganhos de produtividade e de flexibilidade, a ponto de viabilizar a customização em massa (CULOT *et al.*, 2020).

Nosalska *et al.* (2020) empregaram revisão sistemática da literatura e uma combinação de métodos qualitativos e quantitativos para propor um *framework* de definição de Indústria

4.0 com base em trabalhos anteriores. De acordo com os autores, a Indústria 4.0 pode ser definida como “um sistema multidimensional de criação de valor que abrange 42 grupos de termos em variáveis de gestão, organizacionais e de negócios, além de 30 variáveis relacionadas com tecnologia e manufatura”, bem como interdependências que ocorrem entre as variáveis identificadas (NOSALSKA *et al.*, 2020, p.837, tradução minha).

Os trabalhos de Culot *et al.* (2020) e Nosalska *et al.* (2020) se assemelham ao propor *frameworks* que buscam definir Indústria 4.0 a partir do estudo de trabalhos anteriores na área. Nessa ambição, o *framework* proposto por Culot *et al.* (2020) é mais detalhado e específico e, por esse motivo, é considerado como a principal referência de definição de Indústria 4.0 para este trabalho.

2.1.2. Motivadores para a Indústria 4.0

A adoção da Indústria 4.0 nas empresas é motivada por uma série de ganhos potenciais para o negócio. Nesta Subseção, serão discutidos os principais fatores de motivação para a adoção da Indústria 4.0. O recorte realizado enfatiza, neste momento, o nível de empresas individuais, uma vez que aspectos relevantes aos países serão destacados na Subseção 2.1.4.

Culot *et al.* (2020) identificaram sete resultados possíveis que podem ser relacionados à Indústria 4.0 no nível de empresas individuais (listados em ordem de ocorrência): produtividade, flexibilidade, customização em massa, sustentabilidade ambiental, tempo e custo para o mercado, qualidade e *lead time*. Chama a atenção que esses autores não incluíram a criação de novos modelos de negócios como resultado, mas citam esse fator como um habilitador para a Indústria 4.0. A possibilidade de criação de novos modelos de negócio é um dos motivadores principais mencionados em outros trabalhos na área (ver KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

A fim de delimitar a discussão de motivadores para a adoção da Indústria 4.0 nesta Subseção, serão discutidos os quatro resultados mais citados identificados por Culot *et al.* (2020). A discussão de flexibilidade é agrupada com a de customização em massa, dado o seu relacionamento. Aos quatro resultados de Culot *et al.* (2020), é incluída a criação de novos modelos de negócio (Figura 2).

Figura 2 – Principais motivadores para a Indústria 4.0

Fonte: elaborado pelo autor.

A busca por ganhos de produtividade está no cerne das iniciativas de Indústria 4.0, uma vez que a Indústria 4.0 surgiu como um esforço que visa a viabilizar a produção em países com alto custo de mão de obra (KAGERMANN; LUKAS; WAHLSTER, 2011). A expectativa é que a adoção das tecnologias relacionadas com a Indústria 4.0, associada a mudanças organizacionais decorrentes da digitalização, possa aumentar a produtividades das empresas por meio, por exemplo, da automação de operações, do incremento da colaboração, da otimização de operações com base em dados e da alocação mais eficiente de recursos (FRAGAPANE *et al.*, 2020; RÜSSMANN *et al.*, 2015; SCHUH *et al.*, 2014). Na vertente de ganhos de produtividade, é comum a associação da Indústria 4.0 com a adoção prévia da abordagem de produção enxuta (ver BUER; STRANDHAGEN; CHAN, 2018).

A possibilidade de se produzir produtos customizados conforme a demanda de segmentos e clientes específicos, mantendo custos controlados e a viabilidade econômica da produção, é uma meta das empresas de manufatura há muitos anos. Até recentemente, a busca pela customização em massa enfocou abordagens como a modularização e o emprego de tecnologias específicas como configuradores de produto para a obtenção de pedidos de consumidores individuais. A flexibilidade do sistema de produção é um fator relevante para a customização em massa, mas enfrentava limitações tecnológicas (FOGLIATTO; DA SILVEIRA; BORENSTEIN, 2012; SALVADOR; HOLAN; PILLER, 2009; SILVEIRA; BORENSTEIN; FOGLIATTO, 2001). Com a adoção de tecnologias da Indústria 4.0, como, por exemplo, a Manufatura Aditiva, a expectativa é que seja possível atingir maior flexibilidade e, com isso, viabilizar a produção em lotes menores ou até mesmo de produtos individuais, dependendo do setor industrial (RAZA *et al.*, 2018; ZANCUL *et al.*, 2016a).

Em termos de sustentabilidade ambiental, estudos recentes estabelecem a relação entre a adoção da Indústria 4.0 com o projeto de produtos de menor impacto ambiental (*Design for Environment*) e a redução de impactos ambientais na produção e na cadeia de suprimentos (DE SOUSA JABBOUR *et al.*, 2018a). Além disso, entende-se que tecnologias da Indústria 4.0 podem favorecer a Economia Circular (DE SOUSA JABBOUR *et al.*, 2018b).

Por fim, a Indústria 4.0 envolve a expectativa de exploração de novos modelos de negócios (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013). Nesse sentido, destaca-se a tendência de servitização tanto de produtos como das funções da manufatura (CULOT *et al.*, 2020), por meio dos chamados Sistemas Produto-Serviço (PSS, do inglês *Product Service System*), que integram serviços de maior valor agregado aos produtos físicos (BAINES *et al.*, 2007). Tecnologias da Indústria 4.0, como Internet das Coisas, são consideradas viabilizadoras de soluções baseadas em PSS (KUHLENKÖTTER *et al.*, 2017; PIROLA *et al.*, 2020; ZANCUL *et al.*, 2016b). Além disso, a Indústria 4.0 induz o aumento das possibilidades de colaboração e de cocriação em ecossistemas de inovação (BENITEZ; AYALA; FRANK, 2020), podendo resultar em oportunidades para novos negócios.

Na Indústria 4.0, a obtenção de ganhos em todas as dimensões discutidas (produtividade, flexibilidade/customização em massa, sustentabilidade, novos modelos de negócio) geralmente é relacionada com a adoção de tecnologias que serão discutidas na próxima Subseção.

2.1.3. Tecnologias de Indústria 4.0

A definição de Indústria 4.0, desde a criação inicial do termo, tem forte vínculo com a aplicação de tecnologias de produção. A questão que frequentemente se coloca, tanto na área acadêmica como na prática, é a delimitação das tecnologias que fazem parte da Indústria 4.0. A dificuldade de delimitação decorre da abrangência do termo (conforme discutido na Subseção 2.1.1) e da ampla variedade de tecnologias de produção hoje disponíveis. Assim, os esforços de delimitação teórica da definição de Indústria 4.0 (discutidos na Subseção 2.1.1) também envolvem a necessidade de delimitação conceitual do escopo de tecnologias que fazem parte da Indústria 4.0.

Nesse sentido, um dos primeiros esforços de criação de uma relação de tecnologias de Indústria 4.0, que foi bem aceito e bastante disseminado no meio industrial em empresas, foi a lista de tecnologias de Indústria 4.0 da empresa de consultoria *Boston Consulting Group*

(BCG), composta por nove itens (RÜSSMANN *et al.*, 2015): robôs autônomos, simulação, integração horizontal e vertical, Internet das Coisas Industrial, cibersegurança, computação em nuvem, Manufatura Aditiva, realidade aumentada, *big data* e *analytics* (Figura 3).

Figura 3 – Principais tecnologias de Indústria 4.0

Fonte: Rüßmann *et al.* (2015), tradução minha.

Apesar da relação de tecnologias da BCG ser bastante difundida e utilizada, ela ainda deixa dúvidas por ser limitada e por não indicar nenhum tipo de hierarquização ou ordenação.

Do ponto de vista teórico, Culot *et al.* (2020), em seu esforço de delimitação conceitual de Indústria 4.0, identificaram treze tecnologias viabilizadoras da Indústria 4.0, que foram classificadas em quatro grupos:

- a. Tecnologias de interface físico/digital: IoT, sistemas ciberfísicos, tecnologias de visualização (como realidade aumentada e virtual).
- b. Tecnologias de rede: computação em nuvem, soluções de interoperabilidade e de cibersegurança, *blockchain*.

- c. Tecnologias de processamento de dados: modelagem e simulação, aprendizado de máquina e Inteligência Artificial, *big data analytics*.
- d. Tecnologias de processos físico/digitais: impressão 3D, robótica avançada, novos materiais, soluções para a gestão de energia.

Com exceção da integração horizontal e vertical, oito das nove tecnologias do modelo da BCG (RÜSSMANN *et al.*, 2015) são contempladas na relação de Culot *et al.* (2020), com algumas alterações na terminologia empregada (por exemplo, Manufatura Aditiva e impressão 3D). Culot *et al.* (2020) adicionam: sistemas ciberfísicos, *blockchain*, aprendizado de máquina e Inteligência Artificial, novos materiais, soluções para a gestão de energia, além de propor uma organização em quatro grupos, como visto acima.

Frank, Dalenogare e Ayala (2019) avançam no entendimento das tecnologias de Indústria 4.0 ao propor um *framework* que apresenta estágios de adoção em uma sequência lógica com base em dados coletados em uma *survey* com 92 empresas. O *framework* é organizado em tecnologias de *front-end* (manufatura inteligente, produto inteligente, trabalho inteligente e *supply-chain* inteligente) e tecnologias de base (nuvem, IoT, *big data* e *analytics*). As tecnologias são organizadas em três estágios de adoção (Figura 4).

Figura 4 – Framework de tecnologias de Indústria 4.0 e estágios de aplicação

Fonte: Frank, Dalenogare e Ayala (2019), tradução minha.

Em comparação com o modelo da BCG e com a relação de tecnologias de Culot *et al.* (2020), o *framework* de Frank, Dalenogare e Ayala (2019) não contempla cibersegurança, *blockchain* e novos materiais. A simulação não é incluída na ilustração do *framework* final, mas é listada nas tabelas de detalhamento das tecnologias. Sistemas ciberfísicos podem ser obtidos por meio da combinação de outras tecnologias contempladas, como IoT. Por outro lado, o *framework* de Frank, Dalenogare e Ayala (2019) detalha a integração vertical – *Enterprise Resource Planning* (ERP), *Manufacturing Execution System* (MES), *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), sensores, atuadores e Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) – e inclui ainda rastreabilidade e linhas de produção flexíveis. Além disso, contempla, em sua estrutura, produto inteligente, trabalho inteligente e *supply-chain* inteligente. Dada a maior abrangência e sofisticação, o *framework* de Frank, Dalenogare e Ayala (2019) é considerado como a principal referência de tecnologias de Indústria 4.0 para este trabalho.

Nota-se que *Digital Twin* não é contemplado em nenhum dos modelos citados anteriormente, apesar de ser uma tecnologia emergente na relação físico-digital. Uma possível explicação se deve ao fato de ser uma tecnologia muito recente, que teve o seu desenvolvimento acelerado somente a partir de 2018.⁴ Dada a relevância do *Digital Twin* para este trabalho, a tecnologia será discutida aqui.

O *Digital Twin* é

a representação digital de um produto individual ativo (dispositivo, objeto, máquina, serviço ou ativo intangível) ou de um Sistema Produto-Serviço individual (um sistema constituído de um produto e um serviço relacionado) que compreende características, propriedades, condições e comportamentos selecionados, por meio de modelos, informações e dados, em uma ou múltiplas fases do ciclo de vida. (STARK; DAMERAU, 2019, n.p., tradução minha)

O *Digital Twin* permite a reprodução, em meio digital, do funcionamento de um sistema físico. Em um *Digital Twin* avançado, alterações no modelo digital devem ser refletidas no modelo físico e vice-versa. Dessa forma, o *Digital Twin* possibilita o monitoramento do

⁴ Uma busca simples pelo termo “*Digital Twin*” no título, *abstract* e palavras-chave na base de dados Scopus indica 7 publicações em 2015, 24 em 2016, 118 em 2017, 353 em 2018, 1.018 em 2019 e 1.709 em 2020. Busca atualizada em 5 de julho de 2021, compreendendo todos os tipos de publicação na base de dados Scopus.

sistema físico em tempo real, bem como a coleta de dados para simulação de operação e predição de comportamentos (ANDERL *et al.*, 2018; HAAG *et al.*, 2019).

Stark, Freseman e Lindow (2019) apresentam um modelo para o projeto de *Digital Twin* em oito dimensões (iniciando do lado esquerdo da Figura 5): 1. amplitude da integração; 2. modos de conectividade; 3. frequência de atualização; 4. nível de “inteligência”; 5. capacidade de simulação; 6. sofisticação do modelo digital; 7. interação humana; 8. ciclo de vida do produto.

Figura 5 – Dimensões de um *Digital Twin*

Fonte: Stark, Freseman e Lindow (2019), tradução minha.

Assim, do ponto de vista conceitual, o *framework* de Frank, Dalenogare e Ayala (2019) com inclusão de *Digital Twin* constitui o referencial teórico de tecnologias da Indústria 4.0 para este trabalho.

2.1.4. Iniciativas dos países para Indústria 4.0 e o papel dos demonstradores

A Indústria 4.0, apesar de ser hoje um termo amplamente difundido e empregado por pesquisadores e profissionais de empresas em diversos países, foi originado como um esforço da indústria localizada na Alemanha para manutenção e ampliação de sua competitividade.

Esse esforço foi estruturado em uma organização específica, a *Plattform Industrie 4.0*, que hoje é liderada pelo governo alemão e conta com a participação ampla e intensa de representantes de empresas, da academia e de sindicatos de trabalhadores, dentre outras instituições relevantes para o desenvolvimento industrial. O foco da *Plattform Industrie 4.0* é a coordenação de esforços para o desenvolvimento de conceitos e tecnologias para a Indústria 4.0 na Alemanha.

Seguindo a institucionalização do tema na Alemanha, outros países criaram iniciativas análogas ou passaram a direcionar as suas iniciativas de política e desenvolvimento industrial para incorporar mais fortemente temas relacionados com a digitalização da manufatura, em resposta à influência da *Plattform Industrie 4.0* (ARBIX *et al.*, 2017, 2018). A Figura 6 apresenta alguns exemplos de iniciativas nacionais recentes para o desenvolvimento da manufatura.

Figura 6 – Exemplos de iniciativas nacionais para o desenvolvimento da manufatura

Fonte: elaborado pelo autor.

No Brasil, essa tendência é representada pela Câmara da Indústria 4.0 (Câmara I4.0), que foi criada em 2019 como objetivo de “formular e implementar iniciativas voltadas para a adoção de tecnologias 4.0 pela indústria brasileira” (CÂMARA ..., 2021, n.p.). A Câmara I4.0 é coordenada pelos Ministérios da Economia e da Ciência, Tecnologia e Inovações e conta com

a participação de representantes da indústria e da academia, além de representantes de diversos órgãos governamentais.

Dentre as ações dos países para o desenvolvimento da Indústria 4.0, destaca-se o fomento (em sentido amplo) para a estruturação de demonstradores tecnológicos. Demonstradores tecnológicos de Indústria 4.0 podem ser definidos como a materialização do desenvolvimento pré-competitivo ou da integração de tecnologias de Indústria 4.0 para fins de demonstração, testes, avaliação e também capacitação. Demonstradores de Indústria 4.0 permitem a agregação de esforços de vários atores e podem resultar em ganhos em diversas dimensões, desde a capacitação profissional até a geração de inovações.

A *Plattform Industrie 4.0*, por exemplo, indica em sua página na Internet mais de 400 casos de aplicação e demonstração de Indústria 4.0. Os casos são organizados em um mapa (PLATTFORM ..., 2021). A Câmara I4.0 estabeleceu no plano de ação do Grupo de Trabalho (GT) Desenvolvimento Tecnológico e Inovação a meta “1.2 Estruturar rede de sistemas para o desenvolvimento e demonstração de tecnologias associadas à Indústria 4.0 aplicados a setores priorizados” (CÂMARA ..., 2021, n.p.). Nessa meta, o primeiro produto é um relatório que identifica e classifica os demonstradores de tecnologia no Brasil (BELLUCCI *et al.*, 2020). Dentre os tipos de demonstradores de Indústria 4.0, este trabalho enfoca as Fábricas de Aprendizagem (*Learning Factories*), discutidas na próxima Seção.

2.2. FÁBRICAS DE APRENDIZAGEM

O tema Fábricas de Aprendizagem é o foco deste trabalho. A teoria sobre Fábricas de Aprendizagem evoluiu consideravelmente nos últimos dez anos, de forma que, atualmente, há sólido embasamento conceitual (ver ABELE; METTERNICH; TISCH, 2019). Nesta Seção 2.2, o referencial teórico sobre Fábricas de Aprendizagem é explorado, com especial ênfase nos aspectos relevantes para este trabalho. Inicialmente, são apresentadas a evolução do conceito e a definição atual de Fábricas de Aprendizagem (Subseção 2.2.1). Em seguida, são descritos exemplos internacionais de referência de Fábricas de Aprendizagem (Subseção 2.2.2). São discutidas as dimensões que compõem uma Fábrica de Aprendizagem e a sua morfologia, estabelecidas na literatura (Subseção 2.2.3). Por fim, é apresentada a abordagem predominante para o projeto e implantação de Fábricas de Aprendizagem (Subseção 2.2.4).

2.2.1. Evolução e definição de Fábricas de Aprendizagem

Fábricas de Aprendizagem, com o objetivo de aprimoramento do ensino de engenharia, já existem desde os anos 1990. Considerando uma perspectiva histórica de evolução das Fábricas de Aprendizagem, Abele, Metternich e Tisch (2019) definiram três fases de evolução:

- Fase 1 (entre 1990 e 2004), de estabelecimento das primeiras Fábricas de Aprendizagem, predominantemente nos Estados Unidos, em paralelo com a instalação de demonstradores de CIM em universidades.
- Fase 2 (entre 2005 e 2010), de disseminação de *Learning Factories*, principalmente na Europa.
- Fase 3 (a partir de 2011), de formação de redes, colaboração para troca de experiências e conceituação teórica, com a criação de uma associação internacional e de um congresso anual com foco em Fábricas de Aprendizagem.

Na primeira fase de evolução, em 1994, um consórcio formado por duas universidades nos Estados Unidos e uma em Porto Rico – Penn State, University of Washington e University of Puerto Rico-Mayaguez – iniciou um projeto para a implantação de uma Fábrica de Aprendizagem em cada instituição (LAMANCUSA; JORGENSEN; ZAYAS-CASTRO, 1997). Naquele momento, o termo *Learning Factory* já foi empregado e havia a compreensão de que esse tipo de iniciativa envolve a estrutura curricular e didática, além da própria infraestrutura física laboratorial. Segundo Lamancusa, Jorgensen e Zayas-Castro

A Fábrica de Aprendizagem é um novo currículo baseado em práticas e uma instalação física para a materialização de produtos. Seu objetivo é oferecer uma experiência de educação aprimorada que enfatize a interdependência entre o projeto e a manufatura em um ambiente de negócios. (LAMANCUSA; JORGENSEN; ZAYAS-CASTRO, 1997, p. 103, tradução minha)

Em 2006, os responsáveis pela concepção do conceito original de *Learning Factory* receberam o Prêmio Bernard M. Gordon da Academia de Engenharia dos Estados Unidos, em reconhecimento à contribuição ao ensino de engenharia (LAMANCUSA *et al.*, 2008).

No mesmo período, outras universidades instalaram laboratórios de demonstração de tecnologias integradas de produção, com foco em CIM. Trata-se, por exemplo, da *Aachener Demonstrationslabor für integrierte Produktionstechnik* (ADITEC) estabelecida em 1992 no Werkzeugmaschinenlabor (WZL) da RWTH Aachen, na Alemanha, e da Fábrica Integrada Modelo (FIM) criada também em 1992 na Escola de Engenharia de São Carlos, como evolução do Projeto CIM Tupiniquim, de 1988. Em geral, os demonstradores de CIM instalados em universidades tinham como foco principal a pesquisa e a inovação para viabilizar cenários integrados de aplicação de tecnologias, muitas vezes em parceria com empresas.

Na segunda fase de evolução, que, conforme Abele, Metternich e Tisch (2019), ocorreu entre 2005 e 2010, observou-se a criação de várias Fábricas de Aprendizagem, principalmente na Europa e mais especificamente na Alemanha. Uma das principais Fábricas de Aprendizagem criadas nesse período foi a *Center for industrial Productivity* (CiP) na TU Darmstadt, na Alemanha (ver detalhamento da Subseção 2.2.2).

A terceira fase, iniciada a partir de 2011, é caracterizada pela sistematização do conhecimento na área, aceleração na disseminação do conceito e expansão da quantidade de Fábricas de Aprendizagem mundialmente (ABELE; METTERNICH; TISCH, 2019). Em 2011, ocorreu a primeira edição da *Conference on Learning Factories* (CLF), evento anual que chegou à sua décima primeira edição em 2021. Desde 2015, a CLF passou a ser considerada como uma das conferências apoiadas pela Academia Internacional de Engenharia de Produção (CIRP), o que contribuiu para a sua divulgação e aumento da sua relevância acadêmica.

Em 2014, no âmbito do CIRP, foi criado um grupo de trabalho colaborativo denominado “*Learning Factories for future oriented research and education in manufacturing*”, com objetivo de reunir e sistematizar o conhecimento na área, favorecendo a criação de um entendimento comum sobre termos e conceitos (ABELE; METTERNICH; TISCH, 2019). O trabalho desse grupo resultou em publicações relevantes para a fundamentação teórica sobre Fábricas de Aprendizagem (e.g., ABELE *et al.*, 2015, 2017).

Em 2011, também ocorreu a criação de uma associação de Fábricas de Aprendizagem denominada *Initiative on European Learning Factories* (IELF), com foco inicial na Europa. Em 2017, com o aumento do interesse por Fábricas de Aprendizagem globalmente, o foco

geográfico da associação foi expandido e o seu nome foi alterado para *International Association of Learning Factories* (IALF).⁵

Observa-se que o período que se inicia em 2011, de consolidação do conceito e aumento do interesse por *Learning Factories*, coincide exatamente com o período de disseminação da Indústria 4.0. Ou seja, a teorização sobre Indústria 4.0 e *Learning Factories* evoluiu simultaneamente.

Em termos de definição, é importante notar que Fábricas de Aprendizagem são tipicamente associadas a uma relevante inserção no ensino, como já colocado no trabalho pioneiro de Lamancusa, Jorgensen e Zayas-Castro (1997). Segundo Wagner *et al.* (2012), o termo *Learning Factory* é formado pelas palavras “*learning*” e “*factory*”, indicando que deve ser empregado por sistemas que contemplam ambos os aspectos. Ou seja, uma *Learning Factory* deve compreender um ambiente de aprendizagem (*learning*) incluindo processos de produção realísticos (*factory*).

Dependendo do propósito da *Learning Factory*, o aprendizado ocorre por meio do ensino de estudantes, da capacitação de profissionais da indústria e/ou da pesquisa em tecnologias de produção (ou uma combinação desses meios). Assim, os resultados podem ser tanto o desenvolvimento de competências como a inovação. Em complemento, propósitos secundários podem ser estabelecidos, como a demonstração e o teste de tecnologias, além da transferência de conhecimentos para a indústria (ABELE; METTERNICH; TISCH, 2019).

Atualmente, há uma grande variedade de tipos de Fábricas de Aprendizagem, o que requer conceituação abrangente que, ao mesmo tempo, garanta a observação aos elementos centrais da definição. Em sentido estrito, Fábricas de Aprendizagem compreendem a produção de um produto físico, representam uma cadeia de valor real e são apresentadas aos participantes de forma presencial. Em sentido lato, hoje entende-se que Fábricas de Aprendizagem podem também compreender serviços, representar cadeias de valor virtuais e terem apresentação remota (Figura 7).

⁵ No momento da redação deste texto, nenhuma Fábrica de Aprendizagem localizada no Brasil participava da IALF. O mapeamento global de *Learning Factories* realizado por Abele, Metternich e Tisch (2019) identificou uma ocorrência no Brasil, em Piracicaba, denominada “*Product Development Process Learning Factory*”, que não está mais ativa.

Figura 7 – Classificação de Fábricas de Aprendizagem em sentido estrito e sentido lato

Fonte: Abele *et al.* (2015), tradução minha.

A definição atual mais difundida e aceita de Fábrica de Aprendizagem está presente na Enciclopédia CIRP de Engenharia de Produção (ABELE, 2019). Essa definição foi apresentada em parte no Capítulo de Introdução deste trabalho e é reproduzida na íntegra aqui:

Uma Fábrica de Aprendizagem em sentido estrito é um ambiente de aprendizagem especificado por

- processos realistas, incluindo múltiplas estações de trabalho e compreendendo aspectos técnicos e organizacionais;
- uma configuração que pode ser alterada e que se assemelha a uma cadeia de valor real;
- um produto físico sendo produzido; e
- um conceito didático que compreende aprendizado formal, informal e não formal, viabilizado pelas próprias ações dos participantes atuando no laboratório.

Dependendo do propósito da Fábrica de Aprendizagem, o aprendizado ocorre por meio de ensino, capacitação e/ou pesquisa. Consequentemente, os resultados podem ser o desenvolvimento de competências e/ou inovação. Um modelo operacional que garanta a operação sustentável da Fábrica de Aprendizagem é desejável.

Em sentido lato, ambientes de aprendizagem seguindo a definição anterior, mas com as seguintes características

- uma configuração que representa uma cadeia de valor virtual em vez de física, ou
- um serviço em vez de um produto físico, ou

- um conceito didático baseado em ensino remoto em vez de aprendizado presencial
- também podem ser considerados Fábricas de Aprendizagem. (ABELE, 2019, p. 1027, tradução minha)

A definição de Abele (2019) é considerada como a mais apropriada no direcionamento deste trabalho, dada a sua ampla aceitação na comunidade científica atuando na área.

2.2.2. Referências de Fábricas de Aprendizagem

Nesta Subseção, são apresentados exemplos internacionais de referência em Fábricas de Aprendizagem. Foram selecionadas quatro Fábricas de Aprendizagem, todas elas participantes da IALF, sendo duas referências da Europa (Alemanha e Áustria), uma da Ásia (Singapura) e uma dos Estados Unidos (Figura 8).

A Fábrica de Aprendizagem CiP da TU Darmstadt, na Alemanha, é a sede da IALF. Os responsáveis pela CiP são pesquisadores que se destacaram nos últimos anos na fundamentação teórica na área (ver ABLE; METTERNICH; TISCH, 2019). A CiP utiliza um cilindro pneumático compacto e um redutor de velocidades como produtos-exemplo, e tem grande foco no ensino de abordagens de produção enxuta, além da capacitação e pesquisa em tecnologias de Indústria 4.0.

A LEAD Factory, da Graz University of Technology, na Áustria, utiliza um patinete como produto-exemplo. LEAD se refere a *Lean, Energy efficient, Agile, Digital*, que são os temas-foco de atuação do laboratório. A LEAD Factory foi a sede das duas últimas conferências CLF em 2020 e 2021.

A *Model Factory* está localizada no Singapore Institute of Manufacturing Technology (SIMTech), em Singapura. Essa Fábrica utiliza vários processos e equipamentos de montagem como base para apoiar o ensino e a inovação.

Por fim, a *Intelligent Learning Factory* (ILF) está instalada na Purdue University, nos Estados Unidos. A ILF emprega bicicletas como produto-exemplo em sua linha de montagem didática (Figura 8).

Figura 8 – Referências internacionais de Fábricas de Aprendizagem

Fonte: elaborado pelo autor a partir de imagens disponíveis nos *websites* da IALF, CiP e Model Factory⁶.

Os quatro exemplos citados anteriormente e ilustrados na Figura 8 referem-se a Fábricas de Aprendizagem em sentido estrito, com a produção de um produto físico, cadeia de valor real e atividades predominantemente presenciais.

2.2.3. Dimensões e Morfologia de Fábricas de Aprendizagem

Um sistema de representação e classificação das características principais de Fábricas de Aprendizagem foi estabelecido na literatura (ABELE *et al.*, 2015; ABELE; METTERNICH; TISCH, 2019). Esse sistema, denominado Morfologia de Fábricas de Aprendizagem, visa a prover direcionamento para escolhas de projeto de novas *Learning Factories*, possibilitar a descrição e comparação de *Learning Factories* existentes e permitir a identificação de

⁶ A página da IALF na Internet é: <https://ialf-online.net/>. A página do CiP na Internet é: <https://www.prozesslernfabrik.de/>. A página da Model Factory@SIMTech na Internet é: <https://www.a-star.edu.sg/simtech/model-factory@simtech>.

configurações predominantes de *Learning Factories* em diversos contextos e países (ABELE; METTERNICH; TISCH, 2019).

A Morfologia de Fábricas de Aprendizagem, em sua versão mais atual, é composta por sete dimensões (ABELE; METTERNICH; TISCH, 2019): 1. Modelo operacional; 2. Propósito e objetivos; 3. Processo; 4. Estrutura; 5. Produto; 6. Didática; 7. Métricas.

As sete dimensões são operacionalizadas por meio de 60 características e os seus respectivos atributos. A Figura 9 apresenta o detalhamento da Morfologia para a dimensão de Estrutura. A primeira coluna da esquerda na Figura 9 indica as características de Estrutura. As demais colunas indicam os possíveis atributos para cada característica.

Figura 9 – Morfologia de Fábricas de Aprendizagem – exemplo dimensão de Estrutura

Ambiente de aprendizagem	Puramente físico (planejamento + execução)		Fábrica de aprendizagem física suportada por fábrica digital		Fluxo de valor físico da Fábrica de Aprendizagem estendido virtualmente		Puramente virtual (planejamento e execução)		
Escala do ambiente	Em menor escala				Tamanho natural				
Níveis de sistema de trabalho	Estação	Célula	Sistema		Segmento		Fábrica	Rede	
Facilitadores para a mutabilidade	Mobilidade		Modularidade		Compatibilidade		Escalabilidade		Universalidade
Dimensões de mutabilidade	Produto		Processo		Organização			Espaço físico e layout	
Integração de Tecnologia da Informação	TI antes do início de produção (CAD, CAM, simulação)			TI depois do início de produção (PCP, ERP, MES)			TI depois da produção (CRM, PLM, ...)		

Fonte: Abele, Metternich e Tisch (2019), adaptado e traduzido por Grotti (2019).

A Morfologia completa para todas as dimensões é apresentada no Apêndice, que traz a Morfologia com a classificação da Fábrica de Aprendizagem proposta neste trabalho.

2.2.4. Projeto de Fábricas de Aprendizagem

O projeto de Fábricas de Aprendizagem envolve tanto aspectos técnicos como aspectos didáticos (ABELE *et al.*, 2017; KRESS; WUCHTERL; METTERNICH, 2021).

Nos últimos anos, algumas abordagens para o projeto de Fábricas de Aprendizagem foram estabelecidas (ABELE; METTERNICH; TISCH, 2019; TISCH *et al.*, 2016; WAGNER *et al.*, 2015). Uma revisão de literatura recente identificou 35 publicações em que um processo de projeto de *Learning Factories* foi seguido. A análise dessas publicações indicou vários casos em que a abordagem de projeto utilizada é específica, ou seja, foi criada e aplicada somente naquele caso único. Nos casos em que há a aplicação de uma abordagem estabelecida de

projeto, observa-se predominância da chamada Abordagem de Projeto de Darmstadt, definida pelo grupo de trabalho coordenado pelo Prof. Abele na TU Darmstadt (KRESS; WUCHTERL; METTERNICH, 2021).

A Abordagem de Projeto de Darmstadt estabelece o projeto de Fábricas de Aprendizagem em três níveis (ABELE; METTERNICH; TISCH, 2019):

- nível macro (Fábrica de Aprendizagem) – projeto da infraestrutura da *Learning Factory*, incluindo o ambiente de produção, assim como aspectos fundamentais do processo de aprendizagem desejado;
- nível meso (Disciplinas) – projeto de disciplinas, incluindo especificação de competências e a definição de sequências de atividades;
- nível micro (Situações de Aprendizagem) – projeto de situações específicas para aprendizagem.

A Abordagem de Projeto de Darmstadt também estabelece uma sequência lógica de passos (Figura 10). De acordo com essa abordagem, o projeto é iniciado com a definição dos requisitos da instituição e do público-alvo. Em seguida, são definidos os objetivos de aprendizagem, com a especificação das competências desejadas. Os passos anteriores direcionam a configuração da *Learning Factory*, composta por infraestrutura sociotécnica (a fábrica e o seu produto-exemplo) e a infraestrutura didática. Na Figura 10, a “1ª transformação didática” refere-se à definição “do que deve ser feito” e a “2ª transformação didática” refere-se ao detalhamento do “como deve ser feito” (TISCH *et al.*, 2016).

Figura 10 – Abordagem de projeto de Fábricas de Aprendizagem

Fonte: Tisch *et al.* (2016), tradução minha.

A Abordagem de Projeto de Darmstadt foi selecionada para servir de referência neste trabalho por contemplar tanto aspectos didáticos como técnicos e por estar documentada e disponível de forma detalhada em publicações (ABELE; METTERNICH; TISCH, 2019; TISCH *et al.*, 2016).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho seguiu a Abordagem de Projeto de Fábricas de Aprendizagem de Darmstadt (TISCH *et al.*, 2016) e o referencial teórico da área que foi compilado e atualizado por Abele, Metternich e Tisch (2019), conforme discutido na Seção 2.2.

O trabalho como um todo envolveu uma sequência de projetos de fomento para a obtenção dos recursos necessários para a sua execução. Em paralelo à obtenção de recursos, a implantação da Fábrica do Futuro na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) ocorreu de modo evolutivo em fases que foram caracterizadas *ex post* por meio um estudo de caso. Com a evolução da implantação, a infraestrutura da Fábrica do Futuro foi empregada diretamente no ensino e em projetos específicos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P&DI).

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados na concepção, implantação e aplicação da Fábrica do Futuro. O capítulo é organizado em quatro seções. Inicialmente, os projetos de pesquisa e de fomento realizados nos últimos anos e que contribuíram diretamente para a implantação da Fábrica do Futuro são apresentados (Seção 3.1) e a equipe de trabalho envolvida na implantação da Fábrica do Futuro é descrita (Seção 3.2). Em seguida, os procedimentos empregados no projeto e implantação da infraestrutura sociotécnica e da didática da Fábrica do Futuro são detalhados (Seção 3.3). Por fim, as fases da implantação da Fábrica do Futuro, caracterizadas por um estudo de caso *ex post*, são apresentadas (Seção 3.4).

3.1. CRONOLOGIA DOS PROJETOS DE FOMENTO

A implantação da Fábrica do Futuro foi realizada entre 2015 e 2021. Ao longo desse período, recursos foram obtidos por meio de projetos submetidos a editais competitivos, projetos de pesquisa apoiados por agências de fomento e apoio de empresas parceiras. A Figura 11 apresenta a cronologia dos projetos e apoios envolvidos para a implantação da Fábrica do Futuro.

Figura 11 – Cronologia dos projetos e apoios para a implantação da Fábrica do Futuro

Fonte: elaborado pelo autor.

A concepção do laboratório foi iniciada em 2015, com a redação do primeiro projeto tendo como base referências internacionais na área. O projeto “Laboratório Didático Fábrica do Futuro POLI” foi submetido ao edital e-Grad da Pró-Reitoria de Graduação da USP em sua edição 2015/2016. O projeto foi proposto pela Comissão Coordenadora do Curso de Engenharia de Produção da EPUSP, que contava com a participação do autor deste trabalho. O projeto submetido ao edital e-Grad especificava as potenciais disciplinas usuárias do curso de Engenharia de Produção da EPUSP, os métodos de ensino pretendidos, com ênfase em métodos de didática ativa, e as metas acadêmicas. Assim, esse projeto representou a execução da “1ª transformação didática” na Abordagem de Projeto de Darmstadt (TISCH *et al.*, 2016) ilustrada na Figura 10.

O projeto submetido ao edital foi aprovado e recebeu a concessão de R\$49.750,00, que foram empregados principalmente para a aquisição de material permanente (bancadas e equipamentos) e também de material de consumo. A implantação da Fábrica do Futuro foi iniciada em uma pequena sala do Departamento de Engenharia de Produção (PRO) da EPUSP. Com o início da implantação, o laboratório passou a abrigar as atividades de pesquisa de um projeto apoiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) na modalidade “Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura” (BRAGECRIM) que já estava vigente. O projeto, denominado “*Smart Components within Smart Production Processes and Environments*” (SCoPE), foi coordenado no Brasil pelo

Laboratório de Sistemas Computacionais para Projeto e Manufatura (SCPM) da Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP) e contou com a participação do autor deste trabalho como representante da USP e com a colaboração do departamento Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) da TU Darmstadt, na Alemanha. O projeto visava ao desenvolvimento de componentes inteligentes para ambientes de produção inteligentes e tinha grande sinergia com a implantação da Fábrica do Futuro. Com o SCoPE, atividades de pesquisa conjunta com o SCPM da UNIMEP e o DiK da TU Darmstadt passaram a ser realizadas na Fábrica do Futuro, gerando os primeiros resultados de pesquisa do novo laboratório (ver Capítulo 4, Seção 4.3).

No final de 2018, o projeto da Fábrica do Futuro foi contemplado no edital de chamamento público Nº 1/2018 do então Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços, em conjunto com a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), para a criação de ambientes de testes e demonstrações de tecnologias da Indústria 4.0. O projeto foi coordenado pelo autor deste trabalho. O orçamento concedido, no valor de R\$295.966,30, contemplava integralmente máquinas e equipamentos para equipar a Fábrica do Futuro. A aprovação desse projeto no primeiro edital do gênero no país representou um grande avanço no esforço de implantação da Fábrica do Futuro. Além dos recursos financeiros, a aprovação do projeto resultou em ganho de visibilidade para o laboratório, fomentando a atração de parcerias de empresas privadas.

No início de 2019, a Fábrica do Futuro mudou-se do PRO-EPUSP para o novo edifício do Centro de Inovação da USP (InovaUSP), em área maior. A Figura 12 apresenta imagens da primeira sala utilizada para a implantação-piloto da Fábrica do Futuro e da área atual dedicada ao laboratório.

Figura 12 – Evolução do espaço físico da Fábrica do Futuro

Fonte: elaborado pelo autor; acervo de imagens da Fábrica do Futuro.

A Fábrica do Futuro também recebeu aporte financeiro de dois projetos aprovados em editais do Fundo Patrimonial Amigos da POLI (AdP), em 2018 e 2019. Em 2018, o projeto “Ensino baseado em projetos: InovaLab@POLI, *Design Factory* e Fábrica do Futuro 4.0” contemplou recursos para equipar e apoiar a adequação do espaço físico da Fábrica do Futuro. O valor alocado na Fábrica do Futuro foi de R\$27.685,44. Em 2019, o projeto “Projetos de alunos na Fábrica do Futuro da POLI” recebeu R\$61.000,00 para apoiar o emprego da Fábrica do Futuro por alunos, em atividades formais de disciplinas de graduação e em projetos de grupos de extensão. A Fábrica do Futuro passou então a ser empregada mais intensamente em atividade de ensino (ver Capítulo 4, Seção 4.2).

A concepção, implantação e aplicação da Fábrica do Futuro também é parte dos objetivos dos dois projetos de pesquisa do autor na modalidade de bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora (DT) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), aprovados nos editais de 2017 (processo 313293/2017-1 – título “Ambiente de desenvolvimento tecnológico, inovação e empreendedorismo para a Indústria 4.0”) e de 2020 (processo 308804/2020-1 – título “Desenvolvimento de provas de conceito para a Indústria 4.0”).

Adicionalmente, a Fábrica do Futuro recebeu, ao longo de sua implantação, apoio de uma série de empresas parceiras, por meio de convênios com a USP e de doações. A participação de empresas fornecedoras de tecnologia na implantação deu-se, em todos os casos, por meio de fornecimento de um ou mais dos seguintes itens: mão de obra especializada, equipamentos, materiais de consumo ou *softwares*. No modelo de parceria

definido para fornecedores de tecnologia, optou-se por privilegiar o aporte direto de conhecimentos e de materiais para agilizar a implantação da Fábrica do Futuro.

Por fim, mais recentemente, a Fábrica do Futuro passou a ser empregada no desenvolvimento de provas de conceito (POCs, do inglês *Proof of Concept*) de soluções de Indústria 4.0 conforme demandas reais de empresas. Em projetos dessa natureza, as empresas participantes geralmente arcam com os custos de materiais necessários ao desenvolvimento de protótipos. As POCs já realizadas envolvem soluções para o controle de qualidade, monitoramento remoto de dispositivos, automação de baixo custo e logística interna (ver Capítulo 4, Seção 4.4).

A descrição apresentada evidencia que o esforço de implantação e aplicação da Fábrica do Futuro envolveu vários projetos e iniciativas combinadas de forma coerente. Cada um desses projetos empregou abordagens e procedimentos específicos de pesquisa. De uma forma geral considerando o esforço como um todo, o presente trabalho tem natureza de pesquisa aplicada na área de manufatura, segue abordagem de pesquisa qualitativa e tem objetivos primordialmente de pesquisa descritiva. Os procedimentos variam por projeto específico, podendo envolver pesquisa experimental (por exemplo, nos estudos sobre Manufatura Aditiva), estudo de caso (por exemplo, nos mestrados orientados que analisaram o processo de implantação da Fábrica do Futuro) e o desenvolvimento de POCs aplicando um processo de projeto de design como procedimento pedagógico (ver Item 3.3.2.2).

3.2. EQUIPE DE COLABORADORES

A trajetória de concepção, implantação e aplicação da Fábrica do Futuro foi coordenada pelo autor deste trabalho e contou com a participação ativa de uma equipe de colaboradores, dentre os quais estudantes de graduação, estagiários, pesquisadores de pós-graduação, profissionais de empresas parceiras e professores. As principais colaborações e participações na equipe são listadas a seguir.

- **Estudantes de graduação em Trabalho de Formatura:** sete estudantes de graduação, sendo seis do curso de Engenharia de Produção e um do curso de Engenharia Elétrica, realizaram Trabalho de Formatura em tópicos relacionados com a Fábrica do Futuro. Um desses estudantes era aluno da TU Darmstadt da Alemanha realizando intercâmbio na EPSUP – esse aluno realizou somente parte do seu Trabalho de Formatura no laboratório (Trabalho de

Formatura I). O autor deste texto orientou seis dos sete Trabalhos de Formatura. Todos os sete trabalhos realizados contribuíram com a concepção (CHENG, 2016; GUIMARÃES, 2017; SILVA, 2015) ou com a implantação de conceitos e de tecnologias no laboratório (CASSOLI, 2019; HUPFELD, 2019; MORGADO, 2019; SEN, 2019).

- **Estudantes de graduação com bolsa do Programa Unificado de Bolsas (PUB) da USP e em projetos de Iniciação Científica:** a implantação da Fábrica do Futuro contou com a concessão de onze bolsas de graduação do programa PUB da USP entre 2016 e 2020, cada uma delas com duração de um ano. Além disso, participaram da implantação dois estudantes em projeto de Iniciação Científica (projeto “Implantação de um sistema de automação aplicado à linha de produção inteligente da Fábrica do Futuro 4.0” e projeto “Integração de um sistema MES em linha de montagem considerando conceitos e equipamentos da Indústria 4.0”). Os estudantes envolvidos em bolsas PUB e na Iniciação Científica foram orientados pelo autor deste texto.
- **Estagiários:** a equipe da Fábrica do Futuro contou com a participação de dois estagiários de graduação atuando no suporte técnico para instalação, integração e aplicação de tecnologias.
- **Pesquisadores(as) de pós-graduação:** dois pesquisadores e uma pesquisadora de pós-graduação, sendo dois de mestrado e um de doutorado, realizaram e concluíram a sua pesquisa tendo como base a Fábrica do Futuro. Os três trabalhos realizados e concluídos foram orientados pelo autor deste texto. Os trabalhos apoiaram significativamente a implantação e a operação da Fábrica do Futuro (DURÃO, 2020; GROTTI, 2019; LEAL, 2020). No momento da redação deste texto, outras pesquisas de pós-graduação estavam em andamento, a maioria em estágios iniciais.
- **Profissionais de empresas parceiras:** a implantação da Fábrica do Futuro foi auxiliada por profissionais de empresas parceiras. Nesse sentido, foi constituído um grupo de trabalho que realizou reuniões periódicas quinzenais. O papel dos participantes no grupo de trabalho abrangeu desde o direcionamento das prioridades tecnológicas da Fábrica do Futuro até o provimento de mão de obra especializada para atuar em atividades específicas

de implantação de tecnologias. Como exemplo, profissionais de empresas parceiras atuaram diretamente na instalação e configuração de *softwares*, como no caso dos sistemas de gestão empresarial ERP, MES e *Product Lifecycle Management* (PLM).

- **Professores(as):** a implantação da Fábrica do Futuro também foi auxiliada por um conjunto de professores e professoras dos Departamentos de Engenharia Mecatrônica, de Engenharia Mecânica, de Engenharia de Sistemas Eletrônicos, além do próprio Departamento de Engenharia de Produção da EPUSP. Adicionalmente, houve colaboração de professores do Instituto de Ensino e Pesquisa (INSPER) e de um professor da UNIMEP. Os professores e as professoras envolvidas atuaram no direcionamento conceitual e no aconselhamento técnico em áreas como Inteligência Artificial, processamento de imagens, realidade aumentada, Internet das Coisas, Manufatura Aditiva, dentre outras.

A descrição da equipe indica que o projeto contou com participação relevante de colaboradores em vários níveis e intensidades de atuação, conforme o papel desempenhado.

3.3. PROJETO E IMPLANTAÇÃO DA FÁBRICA DE APRENDIZAGEM

O esforço de projeto e implantação da Fábrica do Futuro como um todo empregou a Abordagem de Projeto de Darmstadt como referência. A chamada “1ª transformação didática” foi detalhada no projeto acadêmico submetido ao edital e-Grad da Pró-Reitoria de Graduação da USP. Nesta Seção, são detalhados os aspectos relacionados com a chamada “2ª transformação didática” (Figura 10). A Seção aborda os procedimentos empregados na definição e implantação da infraestrutura sociotécnica (Subseção 3.3.1) e da infraestrutura didática (Subseção 3.3.2).

3.3.1. Definição e implantação da infraestrutura sociotécnica

A definição da infraestrutura sociotécnica compreendeu a definição do produto-exemplo, a especificação e obtenção de equipamentos e a definição do *layout*.

3.3.1.1. Definição do produto-exemplo

A definição do produto-exemplo da Fábrica do Futuro foi baseada em uma série de critérios. A definição dos critérios envolveu estudo da literatura sobre o projeto de Fábricas de Aprendizagem flexíveis (WAGNER *et al.*, 2012, 2015), a pesquisa de referências internacionais de Fábricas de Aprendizagem estabelecidas e o entendimento dos requisitos e limitações da EPUSP para operar o laboratório. A definição de critérios teve apoio dos dois primeiros Trabalhos de Formatura relacionados com a Fábrica do Futuro (CHENG, 2016; SILVA, 2015). Os seguintes critérios para o produto-exemplo foram estabelecidos:

- ter relevância em problema complexo para a sociedade;
- ser conhecido e ter significado para os estudantes;
- possuir variedade de materiais e de processos produtivos, viáveis para a produção e/ou montagem em um laboratório didático, permitindo simular situações reais;
- ser customizável;
- oferecer possibilidade de incorporação de serviços de alto valor agregado, típicos de Sistemas Produto-Serviço;
- permitir reutilização, viabilizando o uso dos materiais por períodos longos, reduzindo o custo operacional e a demanda de orçamento de custeio;
- possuir baixo custo unitário, permitindo alta disponibilidade para não limitar aplicações didáticas.

De acordo com os critérios estabelecidos, um skate customizável foi selecionado como o produto-exemplo da Fábrica do Futuro (Figura 13). Esse produto tem como principais componentes um *shape* (prancha), dois *trucks* (eixos), quatro conjuntos de rodas e rolamentos e também fixadores, além de permitir a agregação de opcionais (como protetores).

A partir da definição do produto, foram especificadas as alternativas de customização, que foram incorporadas na estrutura de produto (ver CASSOLI, 2019). O produto-exemplo customizável permite a escolha da cor das rodas – com cores distintas para as rodas dianteiras e traseiras –, a seleção da rigidez do ajuste dos amortecedores em uma escala contínua de macio a rígido e a seleção de opcionais.

Figura 13 – Produto-exemplo da Fábrica do Futuro

Fonte: elaborado pelo autor; acervo de imagens da Fábrica do Futuro.

A classificação do produto-exemplo selecionado conforme a dimensão de Produto da Morfologia de Fábricas de Aprendizagem é apresentada na Figura 14.

Figura 14 – Morfologia de Fábricas de Aprendizagem –dimensão de Produto

Materialidade	Material (produto físico)				Imaterial (serviço)	
Forma do produto	Carga geral		Carga a granel		Produtos de processo contínuo	
Origem do produto	Desenvolvimento próprio		Desenvolvido pelos participantes		Desenvolvimento externo	
Comercialização do produto	Disponível no mercado		Disponível no mercado, mas didaticamente simplificado		Não disponível no mercado	
Funcionalidade do produto	Produto funcional		Produto didaticamente simplificado com funcionalidade limitada		Sem funcionalidade, aplicado somente para demonstração	
Nº de produtos diferentes	1 produto	2 produtos	3 a 4 produtos	> 4 produtos	Flexível, desenvolvido pelos participantes	Aceitação de pedidos reais
Nº de variantes	1 variante	2 a 4 variantes	5 a 20 variantes	...	Flexível, dependendo dos participantes	Determinado pelos pedidos reais
Nº de componentes	1 componente	2 a 5 componentes	6 a 20 componentes	21 a 50 componentes	51 a 100 componentes	> 100 componentes
Uso posterior do produto	Reuso / reciclagem		Exposição / demonstração	Doação	Venda	Descarte

■ Classificação do produto-exemplo da Fábrica do Futuro

Fonte: Abele, Metternich e Tisch (2019), adaptado e traduzido por Grotti (2019), atualização e classificação minha.

Definido o produto-exemplo, foi possível prosseguir com a especificação do sistema de produção.

3.3.1.2. Materiais: máquinas e equipamentos

Os projetos e apoios descritos na Seção 3.1 resultaram na obtenção dos materiais e demais recursos necessários para a implantação da Fábrica do Futuro. Dada a limitação dos

recursos, optou-se por privilegiar um sistema de montagem manual com emprego de mobiliário e ferramentas flexíveis que podem ser usadas em vários contextos.

Os recursos empregados na Fábrica do Futuro podem ser organizados principalmente em: máquinas e equipamentos de produção (inclusive mobiliário para a produção, como carrinhos de movimentação, bancadas de montagem); *hardware* computacional (computadores, monitores, servidores etc.); *software*; mobiliário (e.g. mesas e cadeiras de escritório); material de consumo. A relação dos principais materiais e demais recursos empregados é descrita na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais materiais empregados na Fábrica do Futuro

Categoria	Descrição	Quant.
Máquinas e equipamentos	Impressora 3D DDDROP EVO Twin	2
Máquinas e equipamentos	Impressora 3D Cloner ST G3	1
Máquinas e equipamentos	Impressora 3D Markforged Mark Two	1
Máquinas e equipamentos	Torquímetro e controladora Atlas Copco ETP STB33	1
Máquinas e equipamentos	Esteira de separação com sistema pneumático	1
Máquinas e equipamentos	Compressor de ar Schulz	1
Máquinas e equipamentos	Kit CLP Festo Siemens	1
Máquinas e equipamentos	Câmera de visão computacional MVISIA ESOS	2
Máquinas e equipamentos	Coletor de dados Acura SMART AT-870	1
Máquinas e equipamentos	Impressora térmica Zebra ZT 410	1
Máquinas e equipamentos	Parafusadeira elétrica Bosch	3
Máquinas e equipamentos	Parafusadeira pneumática Puma	4
Máquinas e equipamentos	Paleteira manual Palettrans TM2220	1
Máquinas e equipamentos	Bancada de montagem em estrutura tubular flexível	5
Máquinas e equipamentos	Carrinho de movimentação em estrutura tubular flexível	3
Máquinas e equipamentos	Estante de materiais em estrutura tubular flexível	1
Máquinas e equipamentos	Estante para almoxarifado de componentes	6
<i>Hardware</i> computacional	Computador desktop	12
<i>Hardware</i> computacional	<i>Single board computer</i> Caninos Loucos Labrador	1
<i>Hardware</i> computacional	Monitor de vídeo <i>touch screen</i> Tanca TMT-520	3
<i>Hardware</i> computacional	Monitor convencional (inclusive televisor)	14
<i>Hardware</i> computacional	Impressora térmica TSC TTP244CE	1
<i>Hardware</i> computacional	Leitor de código de barras Datalogic QD2430	2
<i>Hardware</i> computacional	Servidor de dados em nuvem (empregado como serviço)	4

Categoria	Descrição	Quant.
<i>Software</i>	Sistema <i>Enterprise Resource Planning</i> (ERP) Datasul	1
<i>Software</i>	Sistema <i>Manufacturing Execution System</i> (MES) PC Factory	1
<i>Software</i>	Sistema <i>Product Lifecycle Management</i> (PLM) PTC Windchill	1
<i>Software</i>	Sistema CAD PTC Creo	1
<i>Software</i>	Sistema de impressão 3D Simplify 3D	1
<i>Software</i>	Banco de dados Progress	1
<i>Software</i>	Banco de dados SQL Server	1
Mobiliário	Mesa de escritório	18
Mobiliário	Cadeira de escritório e de sala de aula para capacitação	42
Material de consumo	Kit de skate para atividades de produção	40
Material de consumo	Componentes para automação IFM	Diversos
Material de consumo	Componentes eletrônicos	Diversos
Material de consumo	Material para impressão 3D	Diversos

Fonte: elaborado pelo autor.

Os ativos físicos e os materiais de consumo relacionados na Tabela 1 estão localizados na área do laboratório, com exceção de quatro servidores de dados que são utilizados como serviço fornecido pela nuvem computacional da USP (InterNuvem USP).

3.3.1.3. Definição do *layout*

A definição do *layout* da Fábrica do Futuro ocorreu em dois níveis: 1. definição macro da alocação de espaço e da planta baixa; 2. projeto detalhado do *layout* da linha de montagem. Os dois níveis foram especificados em paralelo, permitindo ajustes mútuos com o avanço do projeto.

No nível macro, a planta baixa da Fábrica do Futuro foi definida considerando as características do espaço físico disponível no andar térreo do edifício do InovaUSP e a relação de atividades e equipamentos a serem contemplados. Uma lista de requisitos foi elaborada e priorizada. Definiu-se que o espaço deveria contemplar: uma linha de montagem para skates; uma área dedicada à Manufatura Aditiva; uma linha de separação automática de materiais composta por uma esteira; uma área para o ensino com capacidade para atender vinte e cinco pessoas; áreas de escritório para representar a engenharia de produto e o planejamento e controle da produção; um almoxarifado; uma casa de máquinas. Além disso, a definição da

planta baixa deveria considerar as rotas de entrada e de saída de pessoas e materiais, bem como a necessidade de fluxo interno de materiais (por exemplo, da Manufatura Aditiva para a linha de montagem). Com base nesses requisitos, foi definida a planta baixa. Essa atividade contou com o apoio de dois estudantes do curso de Arquitetura da Faculdade de Arquitetura de Urbanismo (FAU) da USP, que atuaram na equipe do laboratório como bolsistas da modalidade PUB.

No nível detalhado, o *layout* da linha de montagem de skates foi especificado considerando os princípios da produção enxuta. Essa atividade contou com o apoio de um estudante do curso de Engenharia de Produção, como parte do seu Trabalho de Formatura (HUPFELD, 2019). A atividade envolveu o detalhamento das operações de montagem, o cálculo de tempos de montagem para cada atividade, a determinação do *takt time* e o nivelamento das atividades de montagem entre as bancadas. Também foram especificados os meios para a movimentação de materiais e o abastecimento das bancadas (carrinhos), bem como a forma de movimentação do produto em processo entre as bancadas de montagem. O *layout* definido seguindo os princípios da produção enxuta foi implantado.

3.3.2. Definição e implantação da infraestrutura para a didática

A implantação da infraestrutura para a didática tomou como base o direcionamento da chamada “1ª transformação didática”, estabelecido no projeto original de criação da Fábrica do Futuro, que especificou um conjunto de disciplinas candidatas a utilizar o laboratório. Além disso, o projeto original enfatizava a adoção de métodos de didática ativa. A partir dessa orientação, foi estabelecida uma tipologia de usos possíveis da Fábrica do Futuro do ponto de vista didático para servir de referência para docentes envolvidos.

3.3.2.1. Identificação de disciplinas usuárias e proposição de métodos para o ensino

A partir da implantação da Fábrica do Futuro, buscou-se viabilizar o seu uso didático por outros docentes além daqueles diretamente envolvidos na implantação e que, por essa razão, estavam mais familiarizados com a infraestrutura disponível e a sua potencialidade. Nesse sentido, foi agendada uma visita técnica ao laboratório para docentes do Departamento de Engenharia de Produção da EPUSP. Além disso, foram realizados contatos individuais com docentes de algumas das disciplinas que eram consideradas candidatas a utilizar o laboratório desde o seu projeto original.

A fim de apoiar a aplicação didática da Fábrica do Futuro, foi estabelecida uma tipologia de atividades didáticas, iniciando por visitas técnicas, mas com maior foco na aplicação de métodos de didática ativa, como concebido originalmente no projeto de constituição da Fábrica do Futuro. Seis tipos fundamentais de atividades didáticas foram definidos:

1. **visita técnica** para observação de conceito e/ou tecnologia particular em aplicação;
2. **vivência de atividades de produção** pelos estudantes, com a possibilidade de participarem diretamente de etapas e atividades no ciclo de vida do produto, do projeto do produto até a desmontagem após o uso;
3. **atividade dirigida** de resolução de situação problema e proposição de solução com base em dados coletados e análises considerando o ambiente da Fábrica do Futuro;
4. **projeto** empregando a Fábrica do Futuro como sistema de produção e de Indústria 4.0 para fornecer contexto e delimitar o escopo;
5. **projeto de melhoria** da Fábrica do Futuro, com prototipação da solução proposta e testes no laboratório, permitindo avaliação contextualizada de resultados atingidos;
6. **projeto de POCs de Indústria 4.0** conforme demandas reais de empresas parceiras, tendo a Fábrica do Futuro como referência, fonte de recursos e ambiente de testes.

Essa tipologia orientou o alinhamento com docentes interessados para a definição das atividades didáticas a serem realizadas na Fábrica do Futuro. Cada docente ficou responsável por realizar o detalhamento das atividades didáticas de sua disciplina, no que é equivalente aos níveis meso e micro de detalhamento, conforme a Abordagem de Projeto de Fábricas de Aprendizagem de Darmstadt. Um exemplo de detalhamento da abordagem didática correspondente aos níveis meso e micro é descrito no próximo Item 3.3.2.2 para uma disciplina de responsabilidade do autor desde trabalho.

3.3.2.2. Método de ensino de design em projetos de inovação em parceria com empresas

O desenvolvimento de POCs de Indústria 4.0 de maneira estruturada na Fábrica do Futuro passou a ocorrer em 2020 com envolvimento de estudantes de graduação

matriculados em uma disciplina optativa de ensino baseado em projetos. Essa disciplina emprega uma abordagem de desenvolvimento de produtos com foco em ciclos de prototipagem (ZANCUL *et al.*, 2017).

A disciplina Desenvolvimento Integrado de Produtos (código USP 0303410) foi concebida pelo autor deste trabalho e vinha sendo ministrada regularmente desde 2014 pelo autor em colaboração com outros professores da EPUSP. O foco inicial da disciplina até 2018 foi em projetos de inovação de produtos empregando a abordagem de *Design Thinking*. Na disciplina, estudantes atuam em equipes multidisciplinares na proposição de soluções conforme demandas reais de empresas e instituições parceiras. As equipes multidisciplinares possuem tipicamente entre seis e sete membros, sendo três ou quatro membros oriundos de cursos de Engenharia, um membro estudante de curso de Design ou de Arquitetura, um membro dos cursos de Administração, Economia ou Contabilidade e um membro de uma das demais carreiras de graduação disponíveis na USP. As aulas são geralmente estruturadas em duas partes, sendo a primeira parte expositiva dedicada ao ensino de conceitos e da metodologia de projeto e a segunda parte dedicada ao trabalho em equipe. Em geral, a segunda parte da aula é mais longa, utilizando aproximadamente três quartos do tempo de cada aula. O projeto é estruturado em ciclos, com grande ênfase em trabalho prático aplicado na construção de protótipos da solução. O resultado final de cada projeto é um protótipo funcional para demonstração do conceito da solução (COUTINHO *et al.*, 2017; FERNANDEZ *et al.*, 2017; ZANCUL *et al.*, 2017).

A abordagem de design e de ensino aplicada na disciplina foi baseada em experiências internacionais na área de ensino de desenvolvimento de produtos por meio de projetos (CARLETON; LEIFER, 2009). A abordagem de desenvolvimento empregada na disciplina também reflete a experiência de participação do autor e de professores da USP nas redes internacionais de universidades SUGAR⁷ e *Design Factory Global Network* (DFGN)⁸, voltadas para o ensino de projetos. O autor deste trabalho coordena a participação da USP nessas redes desde 2013 para o SUGAR e desde 2016 para a DFGN. A proposta abrangente de ensino por projetos em equipes multidisciplinares e o embasamento conceitual fez com que a disciplina 0303410 atingisse reconhecimento em nível nacional. A disciplina foi vencedora do Prêmio

⁷ O *website* da rede SUGAR é: <http://www.sugar-network.org/>.

⁸ O *website* da rede DFGN é: <https://dfgn.org/>.

Santander Universidades/Guia do Estudante na categoria de Inovação no Ensino em 2014 e serviu de referência para outras universidades no país, como, por exemplo, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), onde uma disciplina análoga foi criada.

No primeiro semestre de 2020, o oferecimento da disciplina foi focado em demandas da Indústria 4.0. Seis empresas e uma organização não governamental (ONG) em constituição atuando em Economia Circular apresentaram no total nove demandas reais de projetos que foram aceitas para desenvolvimento de POCs na disciplina. A abordagem de desenvolvimento empenhada na disciplina foi adaptada considerando os requisitos e especificidades de projetos para a Indústria 4.0. A principal alteração foi o reforço do ensino de conceitos para a atividade de formulação da Arquitetura da Solução integrando projetos especializados de várias disciplinas (mecânica, elétrica, eletrônica, *software*, usabilidade etc.), uma vez que soluções para a Indústria 4.0 são muitas vezes compostas por sistemas complexos integrados que envolvem o detalhamento de sua arquitetura ao longo do projeto. Além disso, foi previsto o emprego da Fábrica do Futuro para prover tanto recursos de prototipagem como contexto (bancadas, equipamentos, sistemas de informação etc.) para a realização de testes das soluções propostas e prototipadas ao longo da disciplina.

A Figura 15 apresenta o processo de desenvolvimento de POCs de Indústria 4.0 na disciplina 0303410 no primeiro semestre de 2020. Os projetos foram estruturados em quatro fases: 1. entendimento e levantamento de requisitos; 2. ideação e protótipo da função crítica; 3. projetos especializados e protótipo integrado inicial; 4. integração e protótipo final. Após o entendimento do problema e levantamento de requisitos na primeira fase, as demais três fases enfocam o detalhamento progressivo do projeto e a sua materialização por meio de protótipos com nível crescente de maturidade. Ao longo das quatro fases, a disciplina é organizada em nove “Missões de projeto” que representam atividades com entregas de relatório, apresentação ou de protótipo para avaliação.

Figura 15 – Processo de desenvolvimento de POCs de Indústria 4.0 da disciplina 0303410

Fonte: notas de aula da disciplina 0303410 (ZANCUL; LOPES, 2020).

No primeiro semestre de 2020, a disciplina foi iniciada de forma presencial, antes da adoção das restrições impostas pela pandemia de covid-19. Nas primeiras semanas de aula, as atividades presenciais envolveram a formação das equipes, a alocação dos temas dos projetos e visitas técnicas nos laboratórios de prototipagem da EPUSP e na Fábrica do Futuro. Em alguns casos, as equipes também tiveram oportunidade de realizar visitas técnicas nas empresas parceiras antes das restrições de saúde pública a esse tipo de atividade decorrentes da pandemia. As atividades presenciais no início do semestre permitiram que os membros das equipes se conhecessem e criassem vínculos que foram importantes nos meses seguintes de trabalho remoto.

Após a adoção pela Universidade do ensino a distância em decorrência da pandemia de covid-19, foi necessário adaptar a dinâmica da disciplina para o ensino online. Optou-se por manter a estrutura de fases e das missões de trabalho da disciplina sem alteração. As aulas passaram a ser ministradas em ambiente *online*. A estrutura das aulas em duas partes foi mantida, com a primeira parte mais curta, expositiva e comum para todos os participantes, e a segunda parte dedicada ao trabalho em equipe. Para viabilizar o trabalho em equipe em ambiente *online*, foram montadas salas virtuais de trabalho para cada equipe. Os professores e monitores realizaram as atividades de atendimento e discussão dos projetos “visitando” as

salas virtuais de cada uma das equipes. O orçamento das equipes para a compra de materiais de prototipagem também foi mantido. As equipes puderam fazer a aquisição de componentes para a entrega na residência dos membros. Da mesma forma, sempre que possível, foi mantido o apoio a distância de um técnico trabalhando sozinho (em isolamento social em decorrência da pandemia) nos laboratórios de prototipagem da EPUSP e na Fábrica do Futuro. Peças projetadas pelas equipes foram fabricadas e um procedimento para a entrega de materiais com distanciamento social foi criado. Da mesma forma, foi possibilitado o empréstimo de equipamentos para prototipagem e testes, como, por exemplo, sensores disponíveis na Fábrica do Futuro. Com a adoção de todos esses procedimentos, foi possível prover para as equipes os materiais necessários para o desenvolvimento das POCs de Indústria 4.0, conforme objetivos de ensino da disciplina. Os resultados do desenvolvimento de POCs de Indústria 4.0 no laboratório são detalhados no Capítulo 4, na Seção 4.4.

Os procedimentos detalhados de ensino descritos neste Item representam um exemplo dos níveis meso e micro de especificação didática de disciplinas conforme a Abordagem de Projeto de Fábricas de Aprendizagem de Darmstadt.

3.4. CARACTERIZAÇÃO DAS FASES DE IMPLANTAÇÃO

A implantação da Fábrica do Futuro foi objeto de dois estudos de caso de pós-graduação em nível de mestrado que foram orientados pelo autor deste documento (GROTTI, 2019; LEAL, 2020).

Leal (2020), em um estudo de caso *ex post*, delimitou as fases de implantação da Fábrica do Futuro entre 2015 e 2021. Nesse estudo de caso, observou-se que a Fábrica do Futuro seguiu um percurso de implantação em fases evolutivas que difere de outras experiências de implantação de Fábricas de Aprendizagem relatadas na literatura (LEAL; ZANCUL; SCHÜTZER, 2021).

A maioria das Fábricas de Aprendizagem está localizada em países com setor de manufatura altamente desenvolvido e com maior disponibilidade de recursos financeiros e de conhecimentos para projetos de Fábricas de Aprendizagem. Em geral, a implantação de Fábricas de Aprendizagem ocorre em três fases típicas e sequenciais: definição de requisitos; *setup*; operação. Nesse tipo de implantação, a instalação da maior parte da infraestrutura prevista (predial e equipamentos) ocorre na fase de *setup*. A operação e uso são iniciados após o *setup* (LEAL; ZANCUL; SCHÜTZER, 2021).

Os projetos tradicionais de Fábricas de Aprendizagem podem envolver recursos vultuosos que não estavam disponíveis no início da implantação da Fábrica do Futuro em 2015. A situação inicial era de recursos bastante limitados – baixo montante de recursos financeiros para a aquisição de equipamentos, falta de espaço físico adequado, equipe pequena e sobrecarregada, com poucas pessoas com possibilidade de se dedicar em tempo integral ao projeto, alta dependência do trabalho realizado por alunos de graduação ainda em formação e com carga horária comprometida com outras atividades, falta de conhecimentos em algumas áreas tecnológicas da Indústria 4.0 e dificuldade de atração de parceiros para um projeto ainda incipiente. Nesse contexto, optou-se por seguir uma abordagem evolutiva, que possibilitasse a obtenção de resultados intermediários. Ou seja, as fases tradicionais de definição de requisitos, *setup* e operação deveriam ocorrer em ciclos. Após um *setup* mínimo com características de uma planta-piloto, a Fábrica do Futuro passou imediatamente para a fase de operação. O uso do piloto gerou resultados que embasaram a definição de novos requisitos e facilitaram o acesso a maior volume de recursos, em um novo estágio de *setup*.

O estudo de caso *ex post* realizado por Leal (2020) caracterizou três fases evolutivas na trajetória de implantação da Fábrica do Futuro. Em cada fase, as sete dimensões de projeto de Fábricas de Aprendizagem de Abele *et al.* (2015) avançaram, conforme descrito na Tabela 2 (LEAL; ZANCUL; SCHÜTZER, 2021).

Tabela 2 – Fases de implantação da Fábrica do Futuro

Dimensões	Fase 1 – Piloto (2015-2017)	Fase 2 – Expansão (2018-2019)	Fase 3 – Integração (2020 -)
Modelo operacional	- Desenvolvimento próprio - Recursos internos (da Universidade) - Recursos externos públicos	- Desenvolvimento próprio - Recursos internos (da Universidade) - Recursos externos públicos e <u>privados</u>	- Desenvolvimento próprio - Recursos internos (da Universidade) - Recursos externos públicos e privados - <u>Modelo de capacitação profissional e POCs</u>
Propósito e objetivos	- Ambiente de demonstrações e testes - Fábrica de Aprendizagem como instalação de pesquisa	- <u>Ensino</u> - Ambiente de demonstrações e testes - Fábrica de Aprendizagem como <u>objeto</u> e instalação de pesquisa	- <u>Ensino e capacitação profissional</u> - Ambiente de demonstrações e testes - Fábrica de Aprendizagem como objeto e instalação de pesquisa

Dimensões	Fase 1 – Piloto (2015-2017)	Fase 2 – Expansão (2018-2019)	Fase 3 – Integração (2020 -)
Processo	<ul style="list-style-type: none"> - Configuração de pedidos - Montagem 	<ul style="list-style-type: none"> - Configuração de pedidos em configurador do sistema <u>ERP</u> - <u>Planejamento e Controle da Produção</u> - <u>Apontamento da produção no MES</u> - <u>Manufatura Aditiva de componentes</u> 	<ul style="list-style-type: none"> - Configuração de pedidos em configurador do sistema ERP - Planejamento e Controle da Produção - Apontamento da produção no MES - Manufatura Aditiva de componentes - <u>Esteira de separação de componentes</u>
Estrutura	<ul style="list-style-type: none"> - Infraestrutura física - Estações de trabalho - Flexibilidade de produto, processo e organização - Software: configurador de produtos 	<ul style="list-style-type: none"> - Infraestrutura física - Estações de trabalho e <u>célula de montagem</u> - Flexibilidade de produto, processo e organização e <u>layout</u> - <u>Software: novo configurador de produtos, CAD, PLM, ERP, MES</u> 	<ul style="list-style-type: none"> - Infraestrutura física com <u>extensão virtual</u> - Estações de trabalho e célula de montagem - Flexibilidade de produto, processo e organização e <u>layout</u> - <u>Software: novo configurador de produtos, CAD, PLM, ERP, MES, Digital Twin</u>
Produto	<ul style="list-style-type: none"> - Skate configurável - 2 componentes com opções de configuração 	<ul style="list-style-type: none"> - Skate configurável e <u>conectado</u> - 4 componentes com opções de configuração – <u>opcionais, alternativos e configuração flexível</u> - <u>Opcionais produzidos em Manufatura Aditiva</u> - <u>Sistema de conectividade</u> 	<ul style="list-style-type: none"> - Skate configurável e conectado - 4 componentes com opções de configuração – opcionais, alternativos e configuração flexível - Opcionais produzidos em Manufatura Aditiva - Sistema de conectividade
Didática	<ul style="list-style-type: none"> - Visitas - Demonstrações de tecnologias 	<ul style="list-style-type: none"> - Visitas - Demonstrações de tecnologias - <u>Estudantes realizam imersão no processo de montagem</u> - <u>Contexto para projetos acadêmicos</u> - <u>Aplicação didática para projetos de estudantes</u> 	<ul style="list-style-type: none"> - Visitas - Demonstrações de tecnologias - Estudantes realizam imersão no processo de montagem - Contexto para projetos acadêmicos - Aplicação didática para projetos de estudantes - <u>POCs conforme demandas reais</u> - <u>Curso de capacitação</u>
Métricas	- Aprox. 30 m ²	<ul style="list-style-type: none"> - Aprox. 400m² - <u>6 disciplinas de 3 cursos de graduação</u> 	<ul style="list-style-type: none"> - Aprox. 400m² - <u>Disponível para aplicação por qualquer disciplina</u>

Fonte: adaptado de Leal, Zancul e Schützer (2021), grifos dos autores, tradução minha; Leal (2020).

As fases descritas na Tabela 2 ilustram como se deu a implantação da Fábrica do Futuro. Na Fase 1 – Piloto, foi estabelecida infraestrutura básica para ilustrar o potencial de uma Fábrica de Aprendizagem na Universidade e no país. O piloto serviu de base para a Fase 2 – Expansão, em que o espaço físico e os equipamentos e sistemas foram consideravelmente ampliados. Houve também incremento da complexidade das soluções adotadas. Na Expansão, o número de parcerias com empresas também foi ampliado. Houve também crescimento das aplicações didáticas, como, por exemplo, o emprego da Fábrica do Futuro por disciplinas de graduação. Na Fase 3 – Integração, o foco passou a ser a exploração das funcionalidades e das potencialidades dos equipamentos e recursos já disponíveis. Nesse sentido, a solução de *Digital Twin* proposta integra vários dos sistemas de informação da Fábrica do Futuro. Houve também avanço na integração do sistema MES com outros equipamentos de produção, como máquinas de Manufatura Aditiva. Mais detalhes dos procedimentos de implantação da Fábrica do Futuro são descritos em trabalhos relacionados (GROTTI, 2019; LEAL, 2020; LEAL; FLEURY; ZANCUL, 2020; LEAL; ZANCUL; SCHÜTZER, 2021).

Além de caracterizar a trajetória de implantação da Fábrica do Futuro, a abordagem de implantação em fases evolutivas pode ser considerada como uma alternativa para outras Fábricas de Aprendizagem que forem criadas em contextos semelhantes de restrição inicial de recursos (LEAL; ZANCUL; SCHÜTZER, 2021).

4. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados da implantação e da aplicação da Fábrica do Futuro. O capítulo é iniciado com a descrição detalhada da infraestrutura atual da Fábrica do Futuro (Seção 4.1). Em seguida, são discutidos os resultados de ensino (Seção 4.2), de pesquisa (Seção 4.3) e de inovação (Seção 4.4). Por fim, são apresentados os resultados de disseminação (Seção 4.5).

4.1. INFRAESTRUTURA DA FÁBRICA DO FUTURO

Os esforços de concepção e de implantação de uma Fábrica de Aprendizagem ao longo dos últimos anos (desde 2015) resultaram na instalação de infraestrutura dedicada à Fábrica do Futuro no edifício do InovaUSP na Cidade Universitária da USP. Esta seção descreve detalhadamente a infraestrutura como um dos resultados obtidos para a Universidade e para o país. Inicialmente, é apresentada a caracterização da Fábrica do Futuro conforme as definições conceituais da área (Subseção 4.1.1). Em seguida, são descritos os aspectos de produto (Subseção 4.1.2), do espaço físico (Subseção 4.1.3) e da infraestrutura de sistemas de informação (Subseção 4.1.4). Por fim, é apresentado o demonstrador integrado de produção customizada, como o demonstrador mais abrangente e complexo instalado da Fábrica do Futuro (Subseção 4.1.5).

4.1.1. Caracterização da Fábrica do Futuro

A Fábrica do Futuro pode ser caracterizada como uma Fábrica de Aprendizagem em sentido estrito conforme a classificação de Abele *et al.* (2015). Essa classificação é justificada pelo emprego de um produto-exemplo físico (skate), em uma cadeia de valor real e com sua apresentação de forma primordialmente presencial nas instalações da Fábrica do Futuro.

A Fábrica do Futuro também foi classificada de acordo com a Morfologia de Fábricas de Aprendizagem em sete dimensões, conforme Abele, Metternich e Tisch (2019). A Figura 16 ilustra a classificação da Fábrica do Futuro conforme as sete dimensões da Morfologia de Fábricas de Aprendizagem. A classificação detalhada em cada uma das dimensões é apresentada nas Figuras 39 a 45 no Apêndice A.

Figura 16 – Classificação da Fábrica do Futuro conforme Morfologia de Fábricas de Aprendizagem

Fonte: elaborado pelo autor; acervo de imagens da Fábrica do Futuro.

Na dimensão de Modelo operacional, a Fábrica do Futuro é classificada como uma Fábrica de Aprendizagem de instituição acadêmica, que teve desenvolvimento próprio (pela equipe da Universidade), com emprego de recursos internos da Universidade complementados por recursos públicos e privados.

Na dimensão de Propósito e objetivos, a Fábrica do Futuro tem propósito principal de educação e de pesquisa. Na pesquisa, a Fábrica do Futuro atua tanto como objeto de pesquisa como instalação de pesquisa. Além do propósito principal, os propósitos secundários são servir como ambiente de testes e promover a transferência de inovação. O público-alvo é amplo e heterogêneo, abrangendo estudantes de graduação e de pós-graduação e profissionais da indústria.

Na dimensão de Processo, a Fábrica do Futuro envolve processos físicos para a produção discreta de itens unitários, com ênfase na montagem manual empregando equipamentos auxiliares flexíveis. Além da montagem, o único método de produção presente é a Manufatura Aditiva de componentes.

Na dimensão de Estrutura, a Fábrica do Futuro se caracteriza por ser um ambiente físico, em escala real, que representa uma fábrica de montagem completa, com célula e estações de trabalho. As instalações são bastante flexíveis, incluindo flexibilidade do *layout*.

Em termos de Tecnologia da Informação, envolve sistemas de apoio ao projeto e à produção, bem como sistema para o monitoramento de produtos na fase de uso. A infraestrutura física é detalhada na Subseção 4.1.3 e a infraestrutura de Tecnologia da Informação é detalhada na Subseção 4.1.4.

Na dimensão de Produto, a Fábrica do Futuro conta apenas com um produto (skate), conhecido e disponível no mercado, completamente funcional. O produto foi definido de forma a ser customizável pelo usuário. Após o seu uso didático e para demonstrações, o produto é desmontado para ser reutilizado. Aspectos do produto são detalhados na Subseção 4.1.2.

Na dimensão de Didática, são enfatizadas as competências técnicas, metodológicas, sociais e de comunicação. O aprendizado se dá tipicamente de forma presencial no local. Com a pandemia de covid-19, houve incremento de aplicações de ensino remoto. Os tipos de treinamento são variados e envolvem desde visitas e atividades dirigidas até o ensino por projetos.

Por fim, na dimensão de Métricas, a Fábrica do Futuro conta com espaço físico de aproximadamente 450 m². A dedicação de pesquisadores e pessoal interno é equivalente a duas a quatro pessoas atuando em tempo integral. Nos anos de 2019 e 2020, o número de participantes em atividades de ensino e capacitação ficou entre 200 e 500 por ano.

A classificação da Fábrica do Futuro conforme a Morfologia de Fábricas de Aprendizagem (Apêndice A) permite a reflexão sobre as suas características e a comparação com outras Fábricas de Aprendizagem, visando à identificação de oportunidades de melhoria e de expansão da aplicação.

4.1.2. Configurador e conectividade do produto-exemplo da Fábrica do Futuro

A seleção de um skate para ser o produto-exemplo da Fábrica do Futuro ocorreu com base em critérios determinados (ver Item 3.3.1.1). Um dos critérios definidos foi “ser customizável”. Esse critério visava a direcionar a Fábrica do Futuro a representar um sistema de produção flexível para a montagem de produtos customizados com base em variáveis pré-definidas. As variáveis de configuração incluem a escolha das cores das rodas (que podem ser diferentes para rodas dianteiras e traseiras), a escolha do nível de amortecimento (de macio a rígido) e a escolha de componentes opcionais. A partir da definição do produto-exemplo e

de suas variáveis de customização, foi criado um configurador de produtos para servir de interface com os usuários para a colocação de pedidos.

Na tela do configurador de produtos (Figura 17, lado esquerdo), o usuário pode selecionar a cor das rodas traseiras e dianteiras. A indicação de uma cor para as rodas traseiras e dianteiras é obrigatória – o usuário deve selecionar uma das alternativas existentes. No configurador, o usuário também seleciona o nível de amortecimento que deseja, indicado em uma escala contínua entre macio e rígido. Por fim, o usuário deve selecionar os opcionais que deseja incluir. Os opcionais disponíveis são *rails* (um protetor e acessório para manobras) e uma caixa de conectividade para tornar o produto conectado. O usuário pode escolher os acessórios que desejar ou mesmo não escolher nenhum, conforme a sua preferência.

O configurador de produtos foi desenvolvido especialmente para o projeto da Fábrica do Futuro. Ele foi programado pela equipe da empresa parceira do sistema ERP e está integrado ao ERP. Ao se concluir a configuração de um produto no configurador, um pedido é criado no sistema ERP. O configurador pode ser acessado e utilizado em qualquer equipamento com um *browser*, como, por exemplo, *tablets* e *desktops* (Figura 17, lado direito).

Figura 17 – Configurador de produtos da Fábrica do Futuro

Fonte: elaborado pelo autor; acervo de imagens da Fábrica do Futuro.

Como indicado anteriormente, a seleção do produto-exemplo também teve como critério “oferecer possibilidade de incorporação de serviços de alto valor agregado, típicos de

Sistemas Produto-Serviço”. Com base nesse critério, foi desenvolvida uma versão conectada do skate, como um *smart-product* (DURÃO *et al.*, 2020; MORGADO, 2019).

A versão conectada utiliza tecnologias IoT e possui sensores de movimentação que permitem registrar a velocidade instantânea e determinar a posição do skate no espaço (por exemplo, para acompanhar o seu uso e manobras). Um *dashboard* apresenta os parâmetros de utilização, como a distância percorrida e a velocidade, além da posição do skate. O aplicativo do *dashboard* também permite a comunicação com o skate, com o envio de um comando para ligar ou desligar o sistema de iluminação em led (Figura 18).

Figura 18 – Produto conectado da Fábrica do Futuro

Fonte: Durão *et al.* (2020); Morgado (2019); acervo de imagens da Fábrica do Futuro.

O skate conectado corresponde à dimensão de Produto Inteligente no *framework* de tecnologias de Indústria 4.0 de Frank, Dalenogare e Ayala (2019). O skate conectado expande as possibilidades de demonstração tecnológica e de aplicação didática da Fábrica do Futuro para abranger situações de monitoramento de produtos em campo visando à prestação de serviços de maior valor agregado, como é típico no caso de Sistemas Produto-Serviço.

4.1.3. Infraestrutura física da Fábrica do Futuro

A infraestrutura física definitiva da Fábrica do Futuro foi instalada no andar térreo do edifício do InovaUSP, na Cidade Universitária da USP, em São Paulo. O laboratório ocupa uma área de aproximadamente 450 m².

A planta baixa com visão geral da disposição dos espaços na Fábrica do Futuro é apresentada na Figura 19. O espaço contempla área de escritórios de pesquisa (itens 1, 2, 3 e 4 do lado direito da Figura 19) e área que representa a empresa de manufatura e o seu chão de fábrica (lado esquerdo da Figura 19).

Entrando no espaço que caracteriza a empresa e o seu chão de fábrica, vindo pelo corredor da área de escritórios de pesquisa, é possível observar espaços que representam as áreas de vendas, planejamento e controle da produção e engenharia de produto, identificadas com os itens 6, 7 e 15, respectivamente. Próximos à entrada, também estão localizados a casa de máquinas (item 5), uma sala e um espaço de prototipagem (itens 14 e 17) e o almoxarifado de componentes (item 16).

No salão principal está localizada a linha de montagem (item 8), que ocupa a maior parte do espaço físico. Além disso, estão presentes a linha de desmontagem e a esteira separadora (item 10), o espaço para a apresentação do produto conectado (item 9) e a bancada de Manufatura Aditiva (item 13). A entrada de materiais de produção e equipamentos ocorre pelo portão que dá acesso à rua (próximo ao item 11). Uma sala de aula para apresentações e instruções dentro do chão de fábrica complementa a descrição (item 12).

Figura 19 – Layout da Fábrica do Futuro

Fonte: Arquiteto Rogério da Silva Conolly; acervo de imagens da Fábrica do Futuro.

A instalação física realizada é flexível. Por exemplo, os pontos de energia elétrica e de rede de dados estão localizados em estrutura no teto do espaço. Dessa forma, é possível rearranjar o mobiliário e os equipamentos conforme as demandas de aplicações e testes específicos.

Os próximos tópicos apresentam detalhamento do espaço físico e dos recursos de cada uma das áreas principais da Fábrica do Futuro.

4.1.3.1. Linha de montagem

A linha de montagem de skates ocupa posição central no espaço físico da Fábrica do Futuro. A configuração está disposta em “U” e conta com quatro bancadas para montagem.

A Figura 20 apresenta visão geral da linha de montagem. Os componentes para montagem ficam armazenados em uma estante de estoque e são distribuídos para as bancadas de montagem por meio de um carrinho em sistema de *milk run*. As quatro bancadas de montagem estão dispostas de forma sequencial para a montagem inicial, montagem das rodas, ajuste do torque do amortecedor e montagem de opcionais. Por fim, os produtos montados são dispostos no estoque de produtos acabados.

Figura 20 – Visão geral da linha de montagem de skates da Fábrica do Futuro

Fonte: elaborado pelo autor; acervo de imagens da Fábrica do Futuro.

A primeira bancada é equipada com parafusadeira elétrica e impressora de QR code para identificação dos produtos. A segunda bancada é equipada com parafusadeira elétrica e *hardware* de visão computacional para controle de qualidade da montagem das rodas. A

terceira bancada é equipada com um torquímetro automático sem fio. A quarta bancada recebe componentes de Manufatura Aditiva para a montagem de opcionais. Todas as bancadas contam com acesso ao sistema MES. Para isso, nas três primeiras bancadas são empregados computadores *desktop* e na quarta é empregado um *single board computer* (modelo Caninos Loucos Labrador), com a finalidade de testar o uso dessa solução em ambiente de produção.

A linha de montagem conta com mobiliário em formato tubular e flexível, que permite a sua reconfiguração em caso de mudanças nos parâmetros de produção ou em decorrência de projeto de melhoria ou ainda para atender demanda de testes específicos.

4.1.3.2. Área de Manufatura Aditiva

A área de Manufatura Aditiva agrega as quatro máquinas de Manufatura Aditiva disponíveis na Fábrica do Futuro (Figura 21). Das quatro máquinas, três empregam tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM) – duas DDDROP EVO Twin e uma 3D Cloner ST G3 – e uma utiliza tecnologia *Continuous Fiber Reinforcement* (CFR) – Markforged Mark Two.

Figura 21 – Máquinas na área de Manufatura Aditiva da Fábrica do Futuro

Fonte: elaborado pelo autor; acervo de imagens da Fábrica do Futuro.

As duas máquinas DDDrop EVO Twin são direcionadas principalmente para produzir componentes customizados e abastecer a linha de montagem de skates. As outras duas máquinas são empregadas principalmente para apoiar prototipagem, desenvolvimento em projetos de alunos e pesquisas sobre Manufatura Aditiva.

4.1.3.3. Linha de desmontagem e esteira separadora

A linha de desmontagem foi concebida com uma esteira separadora equipada com sistema de controle e separação automática empregando visão computacional. A separação ocorre por meio de automação pneumática, de forma a contemplar essa tecnologia na Fábrica do Futuro (Figura 22).

O produto é desmontado em uma bancada ao lado da esteira separadora. Após a desmontagem, componentes pré-selecionados podem ser posicionados na esteira separadora. Os componentes passam por uma câmera de visão computacional que reconhece as suas características. O sistema de controle é acionado para efetuar a separação por meio de acionamento pneumático. O sistema foi implantado para demonstrar a sua aplicação na separação de rodas de acordo com a sua cor.

Figura 22 – Esteira separadora empregando visão computacional na Fábrica do Futuro

Fonte: elaborado pelo autor; acervo de imagens da Fábrica do Futuro.

Atualmente, o uso da esteira separadora foi expandido para operar como uma linha de inspeção de qualidade e de características de peças utilizando visão computacional, servindo de base para a realização de pesquisa e desenvolvimento nessa área.

4.1.3.4. Sala de aula

Uma sala de aula foi posicionada dentro do ambiente da Fábrica do Futuro. Essa escolha visa a possibilitar a realização de apresentações, discussões e sessões de instrução

com os participantes imersos no mesmo ambiente em que as atividades práticas são realizadas (Figura 23).

Figura 23 – Sala de aula na Fábrica do Futuro

Fonte: elaborado pelo autor; acervo de imagens da Fábrica do Futuro.

A sala de aula conta com capacidade para 25 pessoas. As características do mobiliário e do espaço físico atendem os requisitos para o ensino em sessões de curta duração. Para sessões de longa duração, outras salas de aula podem ser empregadas no mesmo edifício onde está localizada a Fábrica do Futuro.

4.1.3.5. Áreas de escritório de engenharia

A Fábrica do Futuro também conta com espaços específicos que representam as áreas de vendas, planejamento e controle da produção e engenharia de produto. Na área de vendas fica disposto um *tablet* para acesso ao configurador de produtos. A área de planejamento e controle da produção fica localizada ao lado do almoxarifado e conta com acesso ao sistema ERP. A área de engenharia de produto conta com dois computadores com sistema *Computer Aided Design* (CAD) e acesso ao sistema PLM. A área de engenharia de produto também fica próxima das máquinas de Manufatura Aditiva dedicadas à prototipagem.

4.1.3.6. Áreas auxiliares – sala de prototipagem, almoxarifado, casa de máquinas

As áreas auxiliares da Fábrica do Futuro são a sala de prototipagem, o almoxarifado e a casa de máquinas.

A sala de prototipagem abriga mesas de trabalho e estante para armazenagem de protótipos em desenvolvimento por estudantes. A intenção da sala de prototipagem é organizar a atividade de montagem de protótipos em espaço dedicado a essa atividade. Nota-se que a Fábrica do Futuro não é um laboratório de prototipagem típico, como os *makerspaces* e *FabLabs*, que possuem outra natureza de operação. De fato, a Fábrica do Futuro conta com apoio e opera de forma próxima ao InovaLab@POLI, que é um dos *makerspaces* da EPUSP. O InovaLab@POLI é estruturado como oficina e possui um conjunto de equipamentos mais apropriados para apoiar as atividades de prototipagem. Na Fábrica do Futuro, a intenção da sala de prototipagem é apoiar as atividades de ajustes e melhoria de protótipos, em sua transição para a fase de testes no ambiente da Fábrica de Aprendizagem.

O almoxarifado abriga o estoque de peças de reposição, de componentes de produção, de materiais consumíveis e de componentes para projetos de automação.

A sala de máquinas abriga as máquinas dos aparelhos de ar-condicionado e o compressor e o secador de ar para a linha de ar comprimido que abastece os sistemas pneumáticos.

4.1.4. Infraestrutura de sistemas de informação da Fábrica do Futuro

A infraestrutura de sistemas de informação da Fábrica do Futuro abrange sistemas típicos da gestão de empresas de manufatura. O laboratório conta com sistemas disponíveis comercialmente no mercado.

A identificação dos sistemas de informação necessários considerou as fases do ciclo de vida de produtos (Figura 24). A fase de desenvolvimento de produtos conta com apoio de sistema CAD Creo e sistema PLM Wndchill, ambos da PTC. Na fase de vendas, o configurador de produtos foi desenvolvido pela TOTVS, que é fornecedora do sistema ERP. O sistema ERP possui integração com o sistema MES utilizado, fornecido pela PPI-Multitask. O monitoramento de produtos em uso é realizado por meio de uma solução desenvolvida na Fábrica do Futuro e não disponível comercialmente.

Figura 24 – Sistemas de informação da Fábrica do Futuro no ciclo de vida de produtos

Fonte: documentação técnica da Fábrica do Futuro.

Os sistemas PLM, ERP e MES da Fábrica do Futuro estão instalados em servidores virtuais na nuvem computacional da USP.

4.1.5. Demonstrador integrado da Fábrica do Futuro

O demonstrador integrado da Fábrica do Futuro agrega vários conceitos e tecnologias de Indústria 4.0 presentes no laboratório em um cenário coeso de aplicação e demonstração. O demonstrador apresenta um ciclo completo de produção customizada, da colocação do pedido, passando pela montagem, até a entrega do produto para o usuário. O demonstrador também abrange as fases do ciclo de vida de uso e de desmontagem do produto. O fluxo de atividades do demonstrador integrado é descrito na Figura 25.

Figura 25 – Atividades do demonstrador integrado da Fábrica do Futuro

Fonte: elaborado pelo autor.

A demonstração integrada de produção customizada é iniciada com a colocação do pedido customizado pelo usuário no configurador de produtos (ver Figura 17). A conclusão do pedido com as características desejadas no configurador de produtos gera um pedido e uma ordem de produção no sistema ERP. A ordem de produção é transferida para o sistema MES em conjunto com a respectiva estrutura de produto.

O sistema MES apoia a gestão das atividades de montagem em cada bancada de trabalho (linha da “Montagem Fábrica do Futuro” na Figura 25). Na primeira bancada de trabalho, os *trucks* são montados no *shape*. Uma etiqueta com QR code da identificação unitária do pedido é impressa e colada no produto.

Na segunda bancada, o monitor de vídeo do sistema MES indica as cores das rodas a serem montadas conforme o pedido para o produto específico. O operador faz a montagem. A solução de visão computacional, composta por uma câmera e respectivo *software*, verifica as cores das rodas que foram montadas (Figura 26). Essa solução está integrada ao módulo de

controle de qualidade do MES, de forma que a operação só pode ser concluída e o produto só pode avançar para o próximo estágio de produção se a montagem estiver correta.

Figura 26 – Controle de qualidade de montagem customizada de rodas

Fonte: adaptado de Zancul *et al.* (2020); acervo de imagens da Fábrica do Futuro; Sen (2019).

Na terceira bancada, um torquímetro automático com ferramenta sem fio é empregado para realizar o ajuste no aperto da porca que determina o nível de amortecimento dos amortecedores (de macio a rígido), conforme o pedido realizado.

Por fim, na quarta bancada é realizada a montagem dos componentes opcionais solicitados no pedido. Os opcionais disponíveis são os protetores (*rails*) e a caixa de conectividade. Tanto os protetores como a carcaça da caixa de conectividade são fabricados em Manufatura Aditiva, que abastece a linha de montagem. Uma integração por meio de *Application Programming Interface* (API) foi desenvolvida no laboratório para integrar as máquinas de Manufatura Aditiva DDDrop Evo Twin ao sistema MES. Cada vez que um pedido é gerado contendo um opcional produzido em Manufatura Aditiva, a API é empregada para iniciar automaticamente a produção. A API também permite que o banco de dados do MES receba atualizações sobre o progresso da fabricação em Manufatura Aditiva (Figura 27).

Figura 27 – Produção de componentes opcionais em Manufatura Aditiva

Fonte: adaptado de Durão *et al.* (2021).

Com a montagem dos opcionais selecionados, a montagem é concluída e o produto customizado é entregue ao usuário.

Após a montagem, a demonstração segue para ilustrar a fase do ciclo de vida de uso do produto, com a apresentação das tecnologias IoT do produto conectado de forma relacionada com os conceitos de Sistemas Produto-Serviço. Por fim, a demonstração avança para o fim do ciclo de vida, com a desmontagem do produto e separação de componentes na esteira separadora.

O conjunto de tecnologias de Indústria 4.0 empregado nesse demonstrador é indicado na Figura 28 (abaixo), conforme o *framework* proposto por Frank, Dalenogare e Ayala (2019).

Na Fábrica do Futuro, a gestão da produção é realizada por sistemas ERP e MES integrados e operando em nuvem. A câmera de visão computacional atua como sensor e um CLP está presente na esteira separadora para comandar o sistema pneumático de separação. Os produtos são identificados com um número único e QR code para rastreabilidade na linha de montagem. A câmera de visão computacional, empregando Inteligência Artificial, realiza verificação automática de problemas de qualidade. A linha de produção é flexível e há emprego de Manufatura Aditiva.

O skate conectado da Fábrica do Futuro pode ser classificado como um produto conectado passivo, que provê monitoramento por meio de tecnologias de Internet das Coisas e de nuvem.

As máquinas de Manufatura Aditiva DDDrop Evo Twin possibilitam operação remota comandada pelo sistema MES. Por fim, a Fábrica do Futuro já realizou testes simples de

realidade aumentada para prover instruções de trabalho em bancadas específicas. Por enquanto, essa tecnologia foi empregada de forma inicial.

Figura 28 – Tecnologias de Indústria 4.0 empregadas na Fábrica do Futuro conforme modelo de Frank, Dalenogare e Ayala (2019)

Fonte: Frank, Dalenogare e Ayala (2019), tradução minha, adaptado para indicar as tecnologias empregadas na Fábrica do Futuro.

As lacunas de tecnologias de Indústria 4.0 ainda não empregadas na Fábrica do Futuro (marcadas com fundo branco na Figura 28) indicam oportunidades a serem exploradas, como, por exemplo, soluções na área de robótica – com robôs industriais e/ou colaborativos – e soluções na área de gestão de energia.

4.2. RESULTADOS NO ENSINO – GRADUAÇÃO, PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO

Nesta seção, são discutidos os resultados do emprego da Fábrica do Futuro para o ensino. A discussão é estruturada em três partes: graduação e pós-graduação (Subseção 4.2.1); extensão e capacitação profissional (Subseção 4.2.2); outras aplicações no ensino, como Iniciação Científica e Trabalhos de Formatura (Subseção 4.2.3).

4.2.1. Aplicação da Fábrica do Futuro em disciplinas de graduação e de pós-graduação

A aplicação didática da Fábrica do Futuro de forma estruturada foi iniciada em 2019. Desde então, seis docentes (incluindo o autor deste texto) utilizaram a Fábrica do Futuro em sete disciplinas, sendo seis disciplinas de graduação e uma de pós-graduação. A Tabela 3 apresenta um resumo da aplicação da Fábrica do Futuro em disciplinas conforme a tipologia de atividades didáticas especificada no projeto da Fábrica do Futuro.

Tabela 3 – Disciplinas de graduação e de pós-graduação usuárias da Fábrica do Futuro

Disciplina - código	Disciplina – nome (curso)	Ano	Professor autor deste texto ou outro(s)	Atividades	Alunos
PRO3445	Planejamento e Controle da Produção (Engenharia de Produção)	2019	Outro docente	Vivência de atividades de produção. Atividade dirigida.	Aprox. 100
PRO3474	Projeto do Produto e do Processo (Engenharia de Produção)	2019	Autor deste texto	Visita técnica. Projeto empregando a Fábrica do Futuro para fornecer contexto e delimitar o escopo.	69
PRO2719	Materiais e Processos de Produção III (Design)	2019	Autor deste texto	Visita técnica. Projeto empregando a Fábrica do Futuro para fornecer contexto e delimitar o escopo.	41
PRO2315	Ergonomia I (Design)	2019	Outro docente	Projeto de melhoria da Fábrica do Futuro com prototipação e teste – foco em ergonomia.	27
0323100	Introdução à Engenharia Elétrica (Engenharia Elétrica)	2019	Outros docentes	Projeto de melhoria da Fábrica do Futuro com prototipação e teste – foco em soluções eletrônicas	46
0303410	Desenvolvimento Integrado de Produtos (Multidisciplinar)	2020	Autor deste texto em cooperação com outro docente	Projeto de POCs de Indústria 4.0 conforme demandas reais de empresas parceiras, tendo a Fábrica do Futuro como referência, fonte de recursos e ambiente de testes.	66
PRO5828	Projeto do Produto e do Processo (Pós-graduação em Engenharia de Produção)	2019	Autor deste texto	Visita técnica.	6

Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme indicado na Tabela 3, o uso da Fábrica do Futuro foi mais intenso e mais profundo na graduação e bastante limitado na pós-graduação. O uso também foi mais intenso em 2019. Em 2020, a expansão da aplicação didática da Fábrica do Futuro foi severamente limitada pelas restrições impostas pela pandemia de covid-19, uma vez que as atividades didáticas propostas dependem, em sua maioria, de participação presencial. Mesmo com as restrições decorrentes da pandemia, em 2020 ainda foi possível contemplar uma disciplina de projetos.

A Figura 29 apresenta imagens de atividades didáticas realizadas na Fábrica do Futuro. Na disciplina de Planejamento e Controle da Produção (PRO3445), a classe foi dividida em turmas de até 25 pessoas para cada sessão de atividades. Em cada sessão, houve instrução para a atividade na sala de aula e atividade prática na linha de montagem. A disciplina de Ergonomia I do curso de Design da FAU (PRO2315) realizou projeto de melhoria ergonômica das estações de trabalho da Fábrica do Futuro. As propostas foram prototipadas e testadas na linha de montagem. Na disciplina de Introdução à Engenharia Elétrica, uma turma piloto realizou projeto na Fábrica do Futuro. Os alunos propuseram soluções voltadas para a Indústria 4.0, desenvolveram protótipos e realizaram apresentação do projeto.

Figura 29 – Atividades de ensino na Fábrica do Futuro

Fonte: elaborado pelo autor; acervo de imagens da Fábrica do Futuro.

As aplicações didáticas da Fábrica do Futuro na graduação estão sendo sistematizadas e avaliadas por um trabalho de mestrado em andamento, orientado pelo autor deste texto, com foco em Ensino de Engenharia.

4.2.2. Capacitação de profissionais da indústria

A capacitação profissional com emprego da Fábrica do Futuro foi estruturada em duas modalidades: 1. um curso de curta duração, aberto ao público; 2. um formato de curso *in company*, de longa duração.

O curso de curta duração de capacitação profissional na área de Indústria 4.0 foi concebido contemplando imersão na Fábrica do Futuro. O curso tem carga horária de 6 horas e foi planejado para ser ministrado preferencialmente ao longo de um dia.

Esse curso foi estruturado em três partes, além da Introdução e da Conclusão. A Parte 1 é voltada à definição e aos conceitos fundamentais de Indústria 4.0. A Parte 2 apresenta as tecnologias de Indústria 4.0. A Parte 3, por sua vez, contempla a imersão dos participantes no demonstrador integrado de Indústria 4.0 da Fábrica do Futuro. A Figura 30 apresenta a estrutura do curso.

Figura 30 – Estrutura do curso de capacitação para profissionais de indústria

Módulos	Partes e conteúdos
Introdução	Apresentação do professor e participantes, estrutura do curso, alinhamento de expectativas
Parte 1 Conceitos	Definição de Indústria 4.0
	Objetivos da Indústria 4.0
	Conceitos relacionados aos produtos: PSS, produtos inteligentes e <i>Digital Twin</i>
Parte 2 Tecnologias	Visão geral do modelo de tecnologias
	Aprofundamento em tecnologias específicas de Indústria 4.0 (1. Inteligência Artificial; 2. Sistemas de Gestão Empresarial – ERP; 3. Manufatura Aditiva; 4. Robôs Colaborativos; 5. Visão Computacional; 6. Realidade Aumentada)
Parte 3 Imersão	Apresentação da Fábrica do Futuro da USP
	Demonstrador integrado de Indústria 4.0 na Fábrica do Futuro
Conclusão	Considerações sobre priorização de tecnologias para a adoção em empresas
	Aprendizados e encerramento

Fonte: elaborado pelo autor.

O curso de curta duração foi registrado na USP com o nome “Indústria 4.0: conceitos, tecnologias e imersão na Fábrica do Futuro USP” (código 30400124). Originalmente, o curso seria ministrado de forma presencial. Em decorrência da pandemia de covid-19, para não postergar ainda mais o seu primeiro oferecimento, optou-se por realizar um oferecimento do curso por meio remoto no final de 2020. Foram oferecidas cinco turmas para um total de 140 participantes concluintes (Tabela 4).

Tabela 4 – Oferecimentos do curso de capacitação e número de participantes concluintes

Turma	Data	Participantes
1	1/dez/2020	8
2	3/dez/2020	24
3	12/dez/2020	38
4	14 e 15/dez/2020 (noite)	32
5	15/dez/2020	38

Fonte: elaborado pelo autor.

Dos 140 participantes, 65 responderam um questionário de avaliação. Os resultados da avaliação estão tabulados na Tabela 5. A maioria dos respondentes concorda totalmente

ou parcialmente que o demonstrador reflete uma situação real (questão 1). Aproximadamente três quartos dos respondentes concordam totalmente que o demonstrador foi útil para ampliar o seu entendimento sobre conceitos e tecnologias relacionadas com a produção customizada (questões 2 e 3). A pior avaliação foi para a questão 4. Dentre os respondentes, 23,1% não concordam nem discordam e 41,5% concordam parcialmente quando questionados se “O demonstrador da Fábrica do Futuro está suficientemente completo”. Essa resposta indica percepção dos participantes de que o demonstrador pode ser complementado. Por fim, nas questões 5 e 6, a maioria absoluta dos respondentes indica considerar que deve continuar havendo investimento para o avanço da Fábrica do Futuro (92,3% concordam totalmente) e também que gostaria de visitar o laboratório presencialmente com base no que conheceu remotamente (86,1% concordam totalmente).

Tabela 5 – Avaliação do curso de capacitação de curta duração (% dos respondentes, n = 65)

Questão	Discordo totalmente				Concordo totalmente
	1	2	3	4	5
1. A demonstração de montagem customizada do skate é coerente com uma situação real.		1,5%	4,6%	38,5%	55,4%
2. O demonstrador foi útil para ampliar o meu entendimento sobre conceitos de produção customizada.			1,5%	23,1%	75,4%
3. Com o demonstrador foi possível compreender como tecnologias de produção podem ser integradas visando à produção customizada.		1,5%		24,6%	73,9%
4. O demonstrador da Fábrica do Futuro está suficientemente completo.		3,1%	23,1%	41,5%	32,3%
5. A USP deve continuar investindo na evolução do demonstrador da Fábrica do Futuro.			1,5%	6,2%	92,3%
6. Considerando o que vi, eu gostaria de visitar presencialmente a Fábrica do Futuro.			3,1%	10,8%	86,1%

Fonte: elaborado pelo autor.

Uma última questão avaliou o curso empregando a métrica *Net Promoter Score* (NPS), obtendo o índice 86,2%, que é considerada uma avaliação de nível excelente. Questões abertas indicaram oportunidades de melhoria no curso, com ênfase dos participantes sobre a inclusão de temas e de tecnologias ainda não abrangidos.

Além do curso de curta duração, foi estruturado um programa de capacitação de longa duração para ser ministrado *in company*, conforme demandas específicas de empresas. Esse programa visa ao aprofundamento de equipes de profissionais de uma empresa acerca de tecnologias selecionadas, preferencialmente presentes na Fábrica do Futuro, como no caso da Manufatura Aditiva.

O curso foi estruturado em ciclos de capacitação para cada tecnologia, sendo cada ciclo com três partes (Figura 31). Dada uma tecnologia selecionada, a capacitação é iniciada com um *workshop* de introdução, com objetivo de conscientização. Nesse *workshop*, pode ocorrer atividade na Fábrica do Futuro para contato com a tecnologia. No final da primeira parte, são propostas atividades práticas contextualizadas conforme demandas reais da empresa envolvida. Na segunda parte, os participantes realizam as atividades práticas propostas, com objetivo de imersão na tecnologia. Por fim, na terceira parte ocorre um *workshop* de compartilhamento de conhecimentos dos aprendizados das atividades realizadas, com objetivo de absorção. As partes são realizadas com intervalo de aproximadamente uma semana a dez dias, de forma que cada ciclo tem duração aproximada de um mês. A visita à Fábrica do Futuro pode ocorrer em diferentes momentos, dependendo das restrições de agenda e de deslocamento dos participantes.

Figura 31 – Estrutura do curso de imersão *in company*

Fonte: elaborado pelo autor.

Nota: *Dependendo das restrições de agenda e de deslocamento, a imersão pode ocorrer em data diferente do *workshop* de introdução e até mesmo no *workshop* de nivelamento.

O modelo de capacitação *in company* com emprego da Fábrica do Futuro foi realizado de forma piloto, em 2019, para uma empresa que selecionou quatro tecnologias para treinamento. A capacitação contou com aproximadamente dez participantes (com variação dependendo da tecnologia). Esse modelo tem como pontos fortes prover capacitação contextualizada conforme demandas específicas da empresa envolvida. Além disso, as visitas à Fábrica do Futuro permitem que os participantes tenham contato com outras tecnologias de produção de forma crítica. Por fim, trata-se de um formato que possibilita maior aprofundamento por meio de atividades autorreguladas pelos participantes.

4.2.3. Outras aplicações didáticas da Fábrica do Futuro

A Fábrica do Futuro também foi empregada para o ensino em outras situações, com destaque para a realização de atividades de projeto do grupo do Programa Especial de Treinamento (PET) da Engenharia Mecânica da EPUSP. Além disso, a Fábrica do Futuro já foi utilizada como referência para sete Trabalhos de Formatura que atuaram na conceituação do laboratório como sistema de produção ou na implementação de conceitos e tecnologias específicas (CASSOLI, 2019; CHENG, 2016; GUIMARÃES, 2017; HUPFELD, 2019; MORGADO,

2019; SEN, 2019; SILVA, 2015). Por fim, a Fábrica do Futuro é empregada em trabalhos acadêmicos de desenvolvimento individual de alunos, como no caso de dois projetos de Iniciação Científica e de onze bolsistas do Programa Unificado de Bolsas da USP (Figura 32).

Figura 32 – Emprego da Fábrica do Futuro em outras atividades didáticas

Fonte: elaborado pelo autor a partir de imagens do acervo da Fábrica do Futuro, do projeto do grupo PET e de Hupfeld (2019).

As aplicações da Fábrica do Futuro apresentadas na Figura 32 complementam a variedade de seus usos para apoiar o ensino.

4.3. RESULTADOS DE PESQUISA

Na pesquisa, a Fábrica do Futuro foi empregada como instalação de pesquisa (Subseção 4.3.1) e como objeto de pesquisa (Subseção 4.3.2).

4.3.1. Fábrica do Futuro como instalação de pesquisa

No uso da Fábrica do Futuro como instalação de pesquisa, dois trabalhos se destacam, sendo um deles na área de Manufatura Aditiva e o outro em *Digital Twin*.

4.3.1.1. Modelo para a produção distribuída empregando Manufatura Aditiva

Uma pesquisa, realizada no âmbito do projeto SCoPE (ver Seção 3.1), explorou o uso da Manufatura Aditiva para a produção de peças de reposição de forma distribuída, em local mais próximo da necessidade de consumo dessas peças. Para isso, considerou-se que a produção poderia ser coordenada a partir de uma fábrica central, em outra localidade geograficamente distante.

A fim de realizar essa pesquisa, uma máquina de Manufatura Aditiva da Fábrica do Futuro foi equipada com sensores e com uma câmera para permitir a sua operação remota. Na operação remota, foram definidos quatro níveis de independência e descentralização da fábrica de produção em relação à central de operações. A Figura 33 apresenta a visão geral da estrutura do experimento realizado em conjunto com a instituição parceira na Alemanha.

Figura 33 – Modelo de produção distribuída empregando Manufatura Aditiva

Fonte: Durão *et al.* (2016, 2017).

Os diferentes estágios de descentralização foram avaliados em relação a vários aspectos, como a forma de conduzir o controle de qualidade remotamente, o nível de capacitação requerido para os operadores das máquinas e os aspectos de propriedade intelectual do design sendo produzido (DURÃO *et al.*, 2016, 2017).

4.3.1.2. Modelo de *Digital Twin* para a gestão do ciclo de vida

Os sistemas de informação da Fábrica do Futuro e o skate conectado foram empregados na concepção de uma nova proposta de *Digital Twin* para apoiar a fase de uso de produtos. Essa proposta, concebida por um trabalho de doutorado orientado pelo autor deste texto e já concluído (DURÃO, 2020), envolve a combinação de dados internos da empresa com

dados de uso dos produtos para a análise e geração de informações pertinentes aos clientes (Figura 34).

Figura 34 – Modelo de *Digital Twin*

Fonte: Durão (2020).

O modelo proposto na Figura 34 foi instanciado e implantado com os sistemas de informação disponíveis na Fábrica do Futuro. A implantação realizada também empregou o *hardware* e o *software* do skate conectado. O modelo final implantado é apresentado na Figura 35 (DURÃO, 2020).

Figura 35 – Aplicação do modelo de *Digital Twin* na Fábrica do Futuro

Fonte: Durão (2020).

A disponibilidade de recursos de Tecnologia de Informação típicos de uma empresa de manufatura real permitiu a efetiva implantação do modelo de *Digital Twin* proposto na Fábrica do Futuro.

4.3.2. Fábrica do Futuro como objeto de pesquisa

Além do uso da Fábrica do Futuro como instalação de pesquisa, ela também serviu como objeto de pesquisa na área de *Learning Factories* em dois trabalhos de mestrado orientados pelo autor deste texto e já concluídos, que realizaram estudo de caso da implantação da Fábrica do Futuro (GROTTI, 2019; LEAL, 2020). Esses estudos contribuíram para a caracterização de uma estratégia de implantação em fases, que complementa a literatura na área (LEAL; FLEURY; ZANCUL, 2020; LEAL; ZANCUL; SCHÜTZER, 2021).

O uso da Fábrica do Futuro como objeto de pesquisa está sendo incrementado com dois mestrados em andamento, também orientados pelo autor deste texto. Um dos trabalhos enfoca as aplicações didáticas da Fábrica do Futuro e o outro avalia a variedade de Provas de Conceito, buscando definir uma tipologia.

4.4. RESULTADOS DE INOVAÇÃO

O emprego da Fábrica do Futuro na inovação é baseado em um modelo estabelecido para o relacionamento com empresas, apresentado na Subseção 4.4.1. Com base no modelo de relacionamento com empresas, foram realizados desenvolvimentos tecnológicos, descritos na Subseção 4.4.2.

4.4.1. Modelo de relacionamento com empresas

A Fábrica do Futuro é procurada com frequência por empresas de manufatura interessadas em se aproximar da Universidade e cooperar em projetos de inovação na área de Indústria 4.0. As empresas interessadas em Indústria 4.0 podem ser classificadas em dois grandes grupos: 1. empresas fornecedoras de tecnologias de produção (máquinas, equipamentos, *software* etc.); 2. empresas de manufatura que utilizam tecnologias de produção na fabricação de seus produtos (por exemplo, montadoras de automóveis, fabricantes de bens de consumo não duráveis, dentre outros). Cada um desses grupos possui características específicas para projetos de cooperação em Indústria 4.0. Dessa forma, foram estruturados modelos de relacionamento distintos para cada grupo.

No caso de empresas fornecedoras de tecnologias de produção, a proposta de relacionamento com a Fábrica do Futuro em geral envolve a expectativa de que a empresa parceira possa contribuir com o desenvolvimento técnico do laboratório. A contribuição geralmente se dá pelo aporte de máquinas, materiais, *software*, mão de obra técnica especializada ou ainda por uma combinação desses itens. Ao contribuir com o desenvolvimento da Fábrica do Futuro, a empresa pode se beneficiar de várias formas, como na capacitação de seus funcionários, na disseminação da tecnologia para estudantes ou ainda no estabelecimento de relacionamentos com participantes de outras empresas. Uma minuta-padrão de convênio foi criada seguindo os parâmetros estabelecidos pelas principais instâncias de análise de convênios na Universidade. Dessa forma, os termos para a celebração de novas parcerias foram determinados, facilitando a comunicação com futuros parceiros e possibilitando tramitação ágil de convênios dentro da Universidade. Um grupo de trabalho com participação de representantes das empresas foi criado. Esse grupo possui uma agenda de reuniões quinzenais para acompanhamento e direcionamento da evolução do laboratório.

No caso de empresas usuárias de tecnologias de produção, foi estabelecido um grupo que realizou uma primeira reunião presencial no laboratório em setembro de 2019. Para esse tipo de empresa, foi criado um modelo de relacionamento baseado no desenvolvimento de POCs de Indústria 4.0 conforme demandas reais. Em 2020, a proposta para projetos de desenvolvimento de POCs envolveu alunos de graduação em uma disciplina baseada em projetos, integrando ensino com inovação. No desenvolvimento de POCs, espera-se que as empresas participantes arquem com os custos dos materiais necessários para a prototipagem das soluções propostas.

4.4.2. Desenvolvimento tecnológico de soluções para a Indústria 4.0

Os modelos de relacionamento com empresas fornecedoras e usuárias de tecnologias de produção foram aplicados na Fábrica do Futuro com êxito para viabilizar projetos conjuntos e gerar resultados interessantes para as partes envolvidas. Nesta Subseção, são relatados alguns casos de forma ilustrativa.

4.4.2.1. Integração entre soluções de visão computacional e MES

No grupo de trabalho de empresas fornecedoras de tecnologias de produção, representantes de duas empresas participantes identificaram potencial sinergia entre as suas soluções de MES e de visão computacional. A fim de avaliar essa oportunidade, os envolvidos desenvolveram inicialmente uma POC integrando as soluções. Nessa prova de conceito, a solução de visão computacional é empregada gerando dados de controle de qualidade que podem ser utilizados por funcionalidades do MES (Figura 36).

Figura 36 – Detalhamento da integração entre visão computacional e MES

Fonte: adaptado de Durão *et al.* (2021) e Zancul *et al.* (2020); acervo de imagens da Fábrica do Futuro.

A POC foi avaliada e testada no ambiente da Fábrica do Futuro, contribuindo para o aprendizado dos envolvidos. Além disso, foram gerados resultados acadêmicos a partir do experimento realizado (DURÃO *et al.*, 2021; ZANCUL *et al.*, 2020).

4.4.2.2. Desenvolvimento de provas de conceito

No grupo das empresas usuárias, seis empresas e uma ONG atuando em Economia Circular apresentaram no total nove demandas reais de projetos, que foram aceitas para desenvolvimento de POCs em uma disciplina de projetos em equipes multidisciplinares de estudantes (ver 3.3.2.2).

Os nove desafios apresentados envolviam: controle de qualidade (três desafios); localização de dispositivos; monitoramento remoto de dispositivos; automação de baixo custo; aplicativo para gestão da qualidade (5S e 3S); *pick to light* e tecnologias para economia circular. A Figura 37 ilustra seis das nove provas de conceito.

Figura 37 – Exemplos de POCs

Fonte: Relatórios e apresentações dos estudantes que cursaram a disciplina 0303410 ministrada no primeiro semestre de 2020; relatório da equipe Inspacktor no programa USP empreendedorismo.

No final do semestre, todas as nove POCs foram apresentadas aos parceiros da indústria. Várias soluções foram enviadas aos parceiros para testes e avaliações em ambiente de produção. Das nove soluções criadas, cinco tiveram continuidade de aplicação: três soluções resultaram em projetos de continuidade e detalhamento visando à implantação real nas empresas; uma solução resultou na criação de uma *startup* por estudantes de graduação; uma solução apoiou a constituição de uma ONG com participação de estudantes da equipe original da disciplina. Nos casos em que as POCs não se mostraram promissoras para a continuidade dos estudos visando à aplicação prática, nota-se, ainda assim, aprendizado dos estudantes envolvidos, da equipe de pesquisadores da Fábrica do Futuro e dos representantes das empresas.

4.5. RESULTADOS DE DIVULGAÇÃO

Esta última Seção do Capítulo explora os resultados na divulgação para a indústria e a comunidade. Nesse sentido, os principais instrumentos utilizados foram: 1. *website* da Fábrica

do Futuro na Internet; 2. realização de eventos na Fábrica do Futuro; 3. aparições na mídia geral e especializada. Cada um desses meios é descrito brevemente a seguir.

A Fábrica do Futuro possui um *website* na Internet que descreve a sua estrutura e apresenta uma relação de publicações e de notícias.⁹

Em 2019, a Fábrica do Futuro recebeu e organizou eventos para a comunidade, como o 9º Encontro Nacional da Associação Brasileira de Internet Industrial (ABII), realizado em 5 e 6 junho de 2019, a 5ª reunião do Cluster Digitalização na Indústria da Associação de Engenheiros Brasil-Alemanha (VDI Brasil), realizada em 29 de agosto de 2019, e a primeira Reunião de Empresas Parceiras da Fábrica do Futuro, realizada em 12 de setembro de 2019. A Figura 38 apresenta imagens de dois desses eventos.

Figura 38 – Eventos da indústria na Fábrica do Futuro

Fonte: elaborado pelo autor; acervo de imagens da Fábrica do Futuro.

Por fim, a Fábrica do Futuro, com a sua proposta de ensino prático contextualizado e por projetos, atraiu a atenção da mídia geral e especializada. A Fábrica do Futuro foi tema de coberturas realizadas pela imprensa geral (como Globo News e Jornal da Globo), pelos canais de divulgação da Universidade (Jornal da USP) e por veículos de divulgação próprios de parceiros específicos.¹⁰

⁹ O *website* da Fábrica do Futuro é: <https://sites.usp.br/fabricadofuturo/>.

¹⁰ As matérias na mídia são listadas no *website* da Fábrica do Futuro na aba “Mídia”: <https://sites.usp.br/fabricadofuturo/midia/>.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo final do trabalho é organizado em três seções. Inicialmente são apresentadas as conclusões do trabalho realizado (Seção 5.1). Em seguida, são discutidas as implicações para a prática e a pesquisa (Seção 5.2). Por fim, são apresentadas as recomendações de trabalhos futuros na área (Seção 5.3).

5.1. CONCLUSÕES DO TRABALHO REALIZADO

Este trabalho resultou na concepção, implantação e aplicação de uma Fábrica de Aprendizagem voltada para a Indústria 4.0 na USP. O laboratório Fábrica do Futuro está instalado no Centro de Inovação da USP, na Cidade Universitária em São Paulo.

A concepção da Fábrica do Futuro entre 2015 e 2021 foi alinhada ao referencial teórico que foi progressivamente estabelecido na área de Fábricas de Aprendizagem nesse período (ABELE *et al.*, 2017; ABELE; METTERNICH; TISCH, 2019; TISCH *et al.*, 2016; WAGNER *et al.*, 2015). A Fábrica do Futuro possui instalações físicas em tamanho real e utiliza um produto-exemplo também físico em suas atividades didáticas, de demonstração e de teste de tecnologias. Dessa forma, Fábrica do Futuro é classificada como uma Fábrica de Aprendizagem em sentido estrito. O produto-exemplo (skate) possuiu uma versão com recursos de conectividade empregando IoT que permite aplicações didáticas e testes de tecnologias envolvendo conceitos de Sistemas Produto-Serviço. As características da Fábrica do Futuro foram classificadas conforme a Morfologia de Fábricas de Aprendizagem (ver Apêndice), permitindo a sua descrição detalhada e a comparação com outros laboratórios do gênero.

O esforço necessário para a implantação de uma Fábrica de Aprendizagem é muito superior ao que é tipicamente previsto em linhas de fomento na área no país. Nota-se também que, apesar de servir como instalação para pesquisas e possuir características de um recurso multiusuário, a própria concepção ou instalação da Fábrica do Futuro não se enquadra como um projeto de pesquisa em si na concepção utilizada por agências de fomento focadas em pesquisa. Assim, para viabilizar a implantação da Fábrica do Futuro, foi necessário combinar um conjunto relacionado de projetos de forma estruturada e encadeada. A implantação da Fábrica do Futuro contou também com a participação de uma equipe numerosa de professores, pesquisadores de pós-graduação e estudantes de graduação, bem como com a colaboração de profissionais de empresas parceiras.

Do ponto de vista didático, a Fábrica do Futuro foi aplicada para apoiar o ensino em seis disciplinas de graduação e em uma disciplina de pós-graduação, com emprego de variedade de métodos de ensino. A formação de mão de obra qualificada em Indústria 4.0 no laboratório também abrangeu a participação de estudantes em projetos de desenvolvimento, Iniciação Científica e Trabalhos de Formatura. Na capacitação de profissionais da indústria, a Fábrica do Futuro foi empregada em um curso de curta duração realizado para cinco turmas e um curso de capacitação de média duração realizado *in company*. A avaliação do curso de capacitação profissional de curta duração pelos participantes foi bastante positiva.

Na pesquisa, a Fábrica do Futuro vem servindo tanto como instalação para pesquisas quanto como objeto de pesquisa. Na vertente de instalação de pesquisas, um projeto internacional de pesquisa com participação do laboratório resultou na criação de um modelo para a produção distribuída empregando Manufatura Aditiva (DURÃO *et al.*, 2016, 2017). Um trabalho de doutorado já concluído resultou no desenvolvimento de um modelo de *Digital Twin* voltado ao ciclo de vida de produtos, com integração com sistemas de informação típicos de empresas de manufatura (DURÃO, 2020). Na vertente de objeto de pesquisa, o processo de implantação da Fábrica do Futuro foi analisado como estudo de caso em dois mestrados concluídos (GROTTI, 2019; LEAL, 2020).

Por fim, foi especificado um modelo de relacionamento com empresas, com diferenciação conforme as possibilidades e interesses de envolvimento para empresas atuando majoritariamente como fornecedoras de tecnologias de produção e empresas que enfocam a aplicação de tecnologias de produção em suas fábricas. Em projetos de inovação, a Fábrica do Futuro foi empregada no desenvolvimento de provas de conceito. Destaca-se uma prova de conceito que surgiu da interação entre empresas participantes (ZANCUL *et al.*, 2020), além de nove provas de conceito de Indústria 4.0 desenvolvidas por equipes multidisciplinares de estudantes conforme demandas reais de empresas parceiras. Das nove soluções criadas, cinco tiveram continuidade de desenvolvimento visando à sua efetiva adoção e uma resultou em uma empresa *spin-off* formalmente estabelecida no mercado.

5.2. IMPLICAÇÕES PARA A PRÁTICA, PARA A PESQUISA E PARA O ENSINO

Quanto às implicações do presente trabalho para a prática, destacam-se quatro resultados: 1. a própria instalação da Fábrica do Futuro como infraestrutura compartilhada que pode ser aproveitada por outras iniciativas de Indústria 4.0 no país; 2. a criação do modelo

formalizado de relacionamento com empresas, que permitiu o engajamento de parceiros no projeto e que abre a possibilidade para engajamento de novos parceiros; 3. o desenvolvimento de provas de conceito, dentre as quais cinco se mostraram promissoras e progrediram para um estágio mais avançado de projeto, visando à sua efetiva implantação; 4. a geração de uma *spin-off* que iniciou as suas atividades no mercado.

Do ponto de vista da pesquisa, os estudos de caso sobre a implantação da Fábrica do Futuro (GROTTI, 2019; LEAL, 2020) contribuíram para expandir a compreensão sobre as fases de implantação de uma Fábrica de Aprendizagem, especialmente em situações de maior restrição de recursos, em comparação com iniciativas análogas em outros países que contam com setor industrial mais avançado (LEAL; FLEURY; ZANCUL, 2020; LEAL; ZANCUL; SCHÜTZER, 2021). A abordagem de implantação em fases pode ser relevante em outras instituições e países para viabilizar a disseminação de Fábricas de Aprendizagem. Ainda na pesquisa, os modelos propostos de produção distribuída empregando Manufatura Aditiva (DURÃO *et al.*, 2016, 2017) e *Digital Twin* para o ciclo de vida (DURÃO, 2020) representam avanços nas respectivas áreas de estudo.

No ensino, a disponibilidade de uma infraestrutura didática como a Fábrica do Futuro representa um passo importante para possibilitar a adoção de abordagens de didática ativa no ensino de engenharia. O escopo da Fábrica do Futuro é abrangente e pode ser empregado por vários cursos de graduação, com destaque para o curso de Engenharia de Produção por enfocar a formação em conceitos e tecnologias de produção. Um conjunto de seis disciplinas de três cursos de graduação (Engenharia de Produção, Engenharia Elétrica e Design) já empregou a Fábrica do Futuro, e esse tipo de utilização pode ser ainda mais disseminado.

5.3. PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

A Fábrica do Futuro, em seu estágio atual, abre a perspectiva de vários trabalhos futuros em pesquisa, ensino e inovação. Nesse sentido, os principais desafios são os de perenização de uma infraestrutura desse tipo e de escassez de mão de obra técnica dedicada que possibilite ampliar a utilização da capacidade instalada. A superação desses desafios será o foco da coordenação do laboratório a partir da conclusão deste trabalho.

Um objetivo de curto prazo, visando a ampliar a rede de colaboração em nível internacional, será realizar a candidatura da Fábrica do Futuro para membro na rede *International Association of Learning Factories* (IALF). A participação nessa rede, se possível,

contribuirá para manter a Fábrica do Futuro atualizada do ponto de vista conceitual e tecnológico, uma vez que a IALF é a associação que representa a atuação da comunidade acadêmica na área.

Em termos de pesquisas, este trabalho abre várias possibilidades a partir de lacunas e oportunidades identificadas, sendo que alguns tópicos já estão em desenvolvimento. Apesar de toda a fundamentação teórica de Fábricas de Aprendizagem ser baseada em viabilizar o seu uso no ensino, a conceituação e avaliação das aplicações didáticas ainda é limitada. Nesse sentido, um trabalho de mestrado em andamento busca avaliar os resultados do ensino em uma disciplina de graduação, comparando os resultados de uma turma-piloto que utilizou a Fábrica do Futuro com os resultados de outras turmas que não empregaram o laboratório. Um estudo em elaboração, decorrente deste trabalho, busca detalhar um *framework* de tipos de aplicações didáticas de Fábricas de Aprendizagem, com ênfase em abordagens de didática ativa, como o ensino por projetos que foi abordado com profundidade na Fábrica do Futuro. Adicionalmente, um trabalho de mestrado em estágio inicial deve buscar explorar as possibilidades de extensão da Fábrica do Futuro para utilização virtual e remota por estudantes de outras instituições de ensino que não tenham um laboratório desse tipo disponível.

Na pesquisa em tecnologias e conceitos da Indústria 4.0, observa-se um recente crescimento do interesse em trabalhos sobre *Digital Twin*. Apesar da rápida evolução nessa área, ainda há lacunas sobre a adoção do *Digital Twin* no ciclo de vida de produtos. Nesse sentido, um mestrado em fase final de conclusão está mapeando as interdependências entre os conceitos de *Product Lifecycle Management* e de *Digital Twin*. Por fim, nos projetos de inovação para a Indústria 4.0, pôde-se observar que, apesar da recente difusão e crescente emprego do termo “provas de conceito”, a literatura ainda carece de definição teórica que esclareça os vários tipos de POCs que podem ser considerados. Nesse sentido, um mestrado em andamento irá propor e avaliar um *framework* de classificação de provas de conceito.

Em resumo, o presente trabalho resultou em infraestrutura e aplicações de uma Fábrica de Aprendizagem no Brasil. A partir deste trabalho, inúmeras oportunidades são abertas no ensino, pesquisa e inovação para a Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABELE, E. Learning Factory. In: CHATTI, S.; LAPERRIÈRE, L.; REINHART, G.; TOLIO, T. (ed.). **CIRP Encyclopedia of Production Engineering**. 2. ed. Berlin: Springer, 2019. p. 1027–1031.
- ABELE, E.; CHRYSSOLOURIS, G.; SIHN, W.; METTERNICH, J.; ELMARAGHY, H.; SELIGER, G.; SIVARD, G.; ELMARAGHY, W.; HUMMEL, V.; TISCH, M.; SEIFERMANN, S. Learning factories for future oriented research and education in manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 66, n. 2, p. 803–826, 2017.
- ABELE, E.; METTERNICH, J.; TISCH, M. **Learning factories: Concepts, Guidelines, Best-Practice Examples**. Cham: Springer, 2019.
- ABELE, E.; METTERNICH, J.; TISCH, M.; CHRYSSOLOURIS, G.; SIHN, W.; ELMARAGHY, H.; HUMMEL, V.; RANZ, F. Learning factories for research, education, and training. **Procedia CIRP**, v.32, p. 1-6, 2015.
- ANDERL, R.; HAAG, S.; SCHÜTZER, K.; ZANCUL, E. Digital twin technology – An approach for Industrie 4.0 vertical and horizontal lifecycle integration. **it - Information Technology**, v. 60, n. 3, p. 125–132, 2018.
- ARBIX, G.; MIRANDA, Z.; DE TOLEDO, D. C.; ZANCUL, E. D. S. Made in China 2025 e Industrie 4.0: a difícil transição chinesa do *catching up* à economia puxada pela inovação. **Tempo Social**, v. 30, n. 3, p. 143–170, dez. 2018.
- ARBIX, G.; SALERNO, M. S.; ZANCUL, E.; AMARAL, G.; MELO LINS, L. O Brasil e a nova onda de manufatura avançada: o que aprender com a Alemanha, China e Estados Unidos. **Novos Estudos - CEBRAP**, v. 36, n. 3, p. 29-49, nov. 2017.
- BAINES, T. S.; LIGHTFOOT, H. W.; EVANS, S.; NEELY, A.; GREENOUGH, R.; PEPPARD, J.; ROY, R.; SHEHAB, E.; BRAGANZA, A.; TIWARI, A.; ALCOCK, J. R.; ANGUS, J. P.; BASTL, M.; COUSENS, A.; IRVING, P.; JOHNSON, M.; KINGSTON, J.; LOCKETT, H.; MARTINEZ, V.; MICHELE, P.; TRANFIELD, D.; WALTON, I. M.; WILSON, H. State-of-the-art in product-service systems. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 221, n. 10, p. 1543–1552, 2007.
- BELLUCCI, F. S.; PEREIRA, C. E.; FRANK, A. G.; AYALA, N. F.; BENITEZ, G. B.; MATIOTTI, C. A. DE O.; LIMA, V. S. S. **Demonstradores da Indústria 4.0**. Porto Alegre: Núcleo de Engenharia Organizacional, 2020.
- BENITEZ, G. B.; AYALA, N. F.; FRANK, A. G. Industry 4.0 innovation ecosystems: An evolutionary perspective on value cocreation. **International Journal of Production Economics**, v. 228, 2020.
- BUER, S. V.; STRANDHAGEN, J. O.; CHAN, F. T. S. The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 8, p. 2924–2940, 2018.
- CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA 4.0. **Câmara I4.0**. Disponível em: <<https://camara40.com.br/>>. Acesso em: 5 jul. 2021.
- CARLETON, T.; LEIFER, L. **Stanford's ME310 Course as an Evolution of Engineering Design**. 19th CIRP DESIGN CONFERENCE. **Proceedings [...]**. Cranfield: CIRP, 2009.
- CASSOLI, B. B. **Product Architecture Definition and Implementation in a Learning Factory Focused on Industry 4.0**. São Paulo: Trabalho de Formatura (Departamento de Engenharia de Produção) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2019.
- CHENG, Y. W. **Fábrica POLI: detalhamento de uma Fábrica de Ensino no contexto da Indústria 4.0**. Trabalho de Formatura (Departamento de Engenharia de Produção) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- CNI (ED.). **O futuro da formação em engenharia: uma articulação entre as demandas empresariais e as boas práticas nas Universidades**. 1. ed. Brasília: Confederação Nacional da Indústria (CNI), 2021.
- COUTINHO, S. M. V.; VASCONCELLOS, M. P.; ZANCUL, E. S.; YANAZE, L. K. H.; LOPES, R. D. Ensino de projeto do produto: análise de abordagem multidisciplinar com foco em criatividade para inovação em contextos reais. In: PHILPPI, A. J.; FERNANDES, V.; PACHECO, R. C. S. (org.). **Ensino, pesquisa e inovação: desenvolvendo a interdisciplinaridade**. Barueri: Manole, 2017. p. 567–581.
- CULOT, G.; NASSIMBENI, G.; ORZES, G.; SARTOR, M. Behind the definition of Industry 4.0: analysis and open questions. **International Journal of Production Economics**, v. 226, 2020.

- DE SOUSA JABBOUR, A. B. L.; JABBOUR, C. J. C.; FOROPON, C.; FILHO, M. G. When titans meet – Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 132, p. 18–25, 2018a.
- DE SOUSA JABBOUR, A. B. L.; JABBOUR, C. J. C.; GODINHO FILHO, M.; ROUBAUD, D. Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. **Annals of Operations Research**, v. 270, n. 1–2, p. 273–286, 2018b.
- DURÃO, L. F. C. S. **Closed-loop digital twin for the product lifecycle**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.
- DURÃO, L. F. C. S.; CHRIST, A.; ANDERL, R.; SCHÜTZER, K.; ZANCUL, E. Distributed Manufacturing of Spare Parts Based on Additive Manufacturing: use cases and technical aspects. **Procedia CIRP**, v. 57, p. 704-709, 2016.
- DURÃO, L. F. C. S.; CHRIST, A.; ZANCUL, E.; ANDERL, R.; SCHÜTZER, K. Additive manufacturing scenarios for distributed production of spare parts. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 93, n. 1, p. 869–880, 2017.
- DURÃO, L. F. C. S.; MCMULLIN, H.; KELLY, K.; ZANCUL, E. Manufacturing Execution System as an integration backbone for Industry 4.0. In: JUNIO, O. C.; BOURAS, A.; NOËL, F.; RIVEST, L. (ed.). **Green & Blue Technologies to support smart and sustainable organizations**. IFIP 18th International Conference on Product Lifecycle Management. Cham: Springer, 2021 /no prelo/.
- DURÃO, L. F. C. S.; MORGADO, M.; DE DEUS LOPES, R.; ZANCUL, E. Middle of Life Digital Twin: Implementation at a Learning Factory. In: NYFFENEGGER, F.; RÍOS, J.; RIVEST, L.; BOURAS, A. (ed.). **Product Lifecycle Management Enabling Smart X. PLM 2020**. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Cham: Springer, 2020. p. 116–127.
- DUTSON, A. J.; TODD, R. H.; MAGLEBY, S. P.; SORENSEN, C. D. A review of literature on teaching engineering design through project-oriented capstone courses. **Journal of Engineering Education**, v. 86, n. 1, p. 17–28, jan. 1997.
- MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO (Brasil). Resolução nº 2, de 24 de abril de 2019. **Institui as Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia**. Brasília: Conselho Nacional de Educação - Câmara de Educação Superior, 2019.
- FERNANDEZ, C. DE O.; LOPES, R. DE D.; GRIMONI, J. A. B.; ZANCUL, E. DE S. Ensino de projeto do produto: análise de abordagem multidisciplinar com foco em criatividade para inovação em contextos reais. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 12, n. 1, p. 85–95, 2017.
- FOGLIATTO, F. S.; DA SILVEIRA, G. J. C.; BORENSTEIN, D. The mass customization decade: An updated review of the literature. **International Journal of Production Economics**, v. 138, n. 1, p. 14–25, 2012.
- FRAGAPANE, G.; IVANOV, D.; PERON, M.; SGARBOSSA, F.; STRANDHAGEN, J. O. Increasing flexibility and productivity in Industry 4.0 production networks with autonomous mobile robots and smart intralogistics. **Annals of Operations Research**, v. Artificial Intelligence in Operations Management, 2020.
- FRANK, A. G.; DALENOGARE, L. S.; AYALA, N. F. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. **International Journal of Production Economics**, v. 210, p. 15–26, abr. 2019.
- GRAAFF, E. D. E.; KOLMOS, A. Characteristics of Problem-Based Learning. **International Journal of Engineering Education**, v. 19, n. 5, p. 657–662, 2003.
- GROTTI, M. V. D. F. **Classificação e processo de implantação de fábrica de aprendizagem voltada para aspectos da Indústria 4.0**: Estudo de caso Fábrica do Futuro 4.0 USP. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- GUIMARÃES, M. O. **Fábrica do Futuro POLI** - Implementação de uma Fábrica de Ensino voltada para a Indústria 4.0. Trabalho de Formatura (Departamento de Engenharia de Produção) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- HAAG, S.; ANDERL, R.; SCHÜTZER, K.; ZANCUL, E. **Motion-Structural Analysis of Systems Using Digital Twins**. In: FORTIN, C.; RIVEST, L.; BERNARD, A.; BOURAS, A. (eds). **Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era**. Cham: Springer International Publishing, 2019.
- HOBBSAWM, E. J. **A era das revoluções: 1789-1848**. 15. ed. São Paulo: Paz e Terra, 2001.

- HUPFELD, A. **Factory Design of the Learning Factory “Fábrica Do Futuro”**. Trabalho de Formatura I (Departamento de Engenharia de Produção) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- HYMAN, B. From capstone to cornerstone: A new paradigm for design education. **International Journal of Engineering Education**, v. 17, p. 416–420, 2001.
- INTERNATIONAL ASSOCIATION OF LEARNING FACTORIES. **International Association of Learning Factories**. Disponível em: <<https://ialf-online.net/>>. Acesso em: 22 jun. 2021.
- KAGERMANN, H.; LUKAS, W.-D.; WAHLSTER, W. Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. **VDI Nachrichten**, n. 13, 2011.
- KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0**. Frankfurt: Forschungsunion, acatech, 2013.
- KOLMOS, A. Reflections on Project Work and Problem-based Learning. **European Journal of Engineering Education**, v. 21, n. 2, 1996.
- KOLMOS, A. New contribution to PBL? **Högre Utbildning**, v. 5, n. 1, p. 1–5, 2015.
- KRESS, A.; WUCHTERL, S.; METTERNICH, J. **Design Approaches for Learning Factories** – review and evaluation. Proceedings of the Conference on Learning Factories (CLF) 2021. **Anais [...]** Graz: Elsevier, 2021.
- KUHLENKÖTTER, B.; WILKENS, U.; BENDER, B.; ABRAMOVICI, M.; SÜSSE, T.; GÖBEL, J.; HERZOG, M.; HYPKI, A.; LENKENHOFF, K. New Perspectives for Generating Smart PSS Solutions - Life Cycle, Methodologies and Transformation. **Procedia CIRP**, v. 64, p. 217–222, 2017.
- LAMANCUSA, J. S.; JORGENSEN, J. E.; ZAYAS-CASTRO, J. L. The Learning Factory - A New Approach to Integrating Design and Manufacturing into the Engineering Curriculum. **Journal of Engineering Education**, v. 86, n. 2, p. 103–112, 1997.
- LAMANCUSA, J. S.; ZAYAS, J. L.; SOYSTER, A. L.; MORELL, L.; JORGENSEN, J. The Learning Factory: Industry-Partnered Active Learning. **Journal of Engineering Education**, v. 97, n. 1, p. 5–11, 2008.
- LEAL, L. F. **Implementação de uma fábrica de aprendizagem com foco em indústria 4.0: estudo de caso Fábrica do Futuro USP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.
- LEAL, L. F.; FLEURY, A.; ZANCUL, E. Starting up a Learning Factory focused on Industry 4.0. **Procedia Manufacturing**, v. 45, p. 436–441, 2020.
- LEAL, L. F.; ZANCUL, E.; SCHÜTZER, K. **Industry 4.0 Learning Factory Phased Development**. Proceedings of the Conference on Learning Factories (CLF) 2021. **Anais [...]** Graz: Elsevier, 2021.
- MORGADO, M. R. **Projeto e desenvolvimento de sistema eletrônico embarcado para skate da Fábrica do Futuro POLI**. Trabalho de Formatura (Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- NOSALSKA, K.; PIĄTEK, Z. M.; MAZUREK, G.; RZĄDCA, R. Industry 4.0: coherent definition framework with technological and organizational interdependencies. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 31, n. 5, p. 837–862, 2020.
- PIROLA, F.; BOUCHER, X.; WIESNER, S.; PEZZOTTA, G. Digital technologies in product-service systems: a literature review and a research agenda. **Computers in Industry**, v. 123, p. 103301, 2020.
- PLATTFORM INDUSTRIE 4.0. **Plattform Industrie 4.0**. Disponível em: <<https://www.plattform-i40.de/>>. Acesso em: 21 jun. 2021.
- RAZA, A.; HAOUARI, L.; PERO, M.; ABSI, N. Impacts of Industry 4.0 on the Specific Case of Mass Customization Through Modeling and Simulation Approach. In: HANKAMMER S., NIELSEN K., PILLER F., SCHUH G., W. N. (ed.). **Customization 4.0. Springer Proceedings in Business and Economics**. Cham: Springer, 2018. p. 217–234.
- RÜSSMANN, M.; LORENZ, M.; GERBERT, P.; WALDNER, M.; ENGEL, P.; HARNISCH, M.; JUSTUS, J. **Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries**. Munique: The Boston Consulting Group, 2015.
- SALVADOR, F.; HOLAN, P. M. DE; PILLER, F. Cracking the Code of Mass Customization. **MIT Sloan Management Review**, v. spring, 2009.

- SCHEER, A. W. **Business Process Engineering**: Reference Models for Industrial Enterprises. 2a ed. Heidelberg: Springer-Verlag, 1994.
- SCHEER, A.-W. **ARIS - Business Process Frameworks**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 1999.
- SCHUH, G.; POTENTE, T.; VARANDANI, R.; HAUSBERG, C.; FRÄNKEN, B. Collaboration moves productivity to the next level. **Procedia CIRP**, v. 17, p. 3–8, 2014.
- SEN, A. **Industry 4.0 and Computational Vision**: an application based case study at Fabrica do Futuro at USP. Trabalho de Formatura (Departamento de Engenharia de Produção) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- SILVA, J. C. DA. **Fábrica Poli**: Concepção de uma Fábrica de Ensino no Contexto da Indústria 4.0. Trabalho de Formatura (Departamento de Engenharia de Produção) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- SILVEIRA, G.; BORENSTEIN, D.; FOGLIATTO, H. S. Mass customization: Literature review and research directions. **International Journal of Production Economics**, v. 72, n. 49, p. 1–13, 2001.
- STARK, R.; DAMERAU, T. Digital Twin. In: CHATTI, S.; TOLIO, T. (Eds.). **CIRP Encyclopedia of Production Engineering**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. p. 1–8.
- STARK, R.; FRESEMANN, C.; LINDOW, K. Development and operation of Digital Twins for technical systems and services. **CIRP Annals**, v. 68, n. 1, p. 129–132, 2019.
- TISCH, M.; HERTLE, C.; ABELE, E.; METTERNICH, J.; TENBERG, R. Learning factory design: a competency-oriented approach integrating three design levels. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 29, n. 12, p. 1355–1375, 2016.
- TONI, J. DE (ED.). **Uma contribuição ao debate sobre as políticas de desenvolvimento produtivo**: inovação e manufatura avançada. Brasília: ABDI, 2017.
- WAGNER, U.; ALGEDDAWY, T.; ELMARAGHY, H.; MÜLLER, E. The state-of-the-art and prospects of learning factories. **Procedia CIRP**, v. 3, p. 109–114, 2012.
- WAGNER, U.; ALGEDDAWY, T.; ELMARAGHY, H.; MÜLLER, E. Developing products for changeable learning factories. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 9, p. 146–158, 2015.
- XU, L. DA; XU, E. L.; LI, L. Industry 4.0: state of the art and future trends. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 8, p. 2941–2962, abr. 2018.
- ZANCUL, E. D. S.; DURÃO, L. F. C. S.; ROCHA, A. M.; E SILVA, G. D. PLM process and information mapping for mass customisation based on additive manufacturing. **International Journal of Product Lifecycle Management**, v. 9, n. 2, p. 159–178, 2016a.
- ZANCUL, E. DE S.; DURÃO, L. F. C. S.; LOPES, R. DE D.; NAKANO, D. N.; BLIKSTEIN, P.; MAJZOUB, G. G.; DALMON, D. L. An Empirical Study on Design-Based vs. Traditional Approaches in Capstone Courses in Engineering Education. **International Journal of Engineering Education**, v. 33, n. 5, p. 1543–1560, 2017.
- ZANCUL, E. DE S.; SOUSA-ZOMER, T. T.; CAUCHICK-MIGUEL, P. A. Project-based learning approach: improvements of an undergraduate course in new product development. **Production**, v. 27, n. spe, 2017.
- ZANCUL, E. DE S.; TAKEY, S. M.; BARQUET, A. P. B.; KUWABARA, L. H.; CAUCHICK MIGUEL, P. A.; ROZENFELD, H. Business process support for IoT based product-service systems (PSS). **Business Process Management Journal**, v. 22, n. 2, p. 305–323, 2016b.
- ZANCUL, E.; LOPES, R. DE D. **Notas de aulas da disciplina Desenvolvimento Integrado de Produtos (0303410)**. São Paulo: USP, 2020.
- ZANCUL, E.; MARTINS, H. O.; LOPES, F. P.; DA SILVA NETO, F. A. T. V. Machine Vision applications in a Learning Factory. **Procedia Manufacturing**, v. 45, p. 516–521, 2020.

APÊNDICE – MORFOLOGIA DA FÁBRICA DO FUTURO

Neste Apêndice é apresentada a classificação da Fábrica do Futuro empregando a Morfologia de Abele, Metternich e Tisch (2019) em sete dimensões: 1. Modelo operacional (Figura 39); 2. Propósito e objetivos (Figura 40); 3. Processo (Figura 41); 4. Estrutura (Figura 42); 5. Produto (Figura 43); 6. Didática (Figura 44); 7. Métricas (Figura 45).

Figura 39 – Classificação da Fábrica do Futuro conforme Morfologia de Fábricas de Aprendizagem – dimensão de Modelo Operacional

Operador	Instituição acadêmica (universidade, faculdade etc.)		Instituição não acadêmica (ensino técnico, entidade de classe, sindicato etc.)		Operação orientada ao lucro (consultoria, empresa de manufatura etc.)	
Instrutores	Professor / pesquisador	Assistente de pesquisa / pós-graduando(a)	Especialista técnico	Gestor	Consultor	Educador
Desenvolvimento	Desenvolvimento próprio		Desenvolvimento assistido por entidade externa		Desenvolvimento externo	
Financiamento inicial	Recursos internos		Recursos públicos		Recursos externos	
Financiamento na operação	Recursos internos		Recursos públicos		Recursos externos	
Continuidade do Financiamento	Curto prazo (ex. eventos isolados)		Médio prazo (projetos e programas < 3 anos)		Longo prazo (projetos e programas > 3 anos)	
Modelo de negócio para os treinamentos	Modelo aberto				Modelo fechado (programa de treinamento apenas para empresas individuais)	
	Modelo de associação		Taxas por curso

Classificação da Fábrica do Futuro

Fonte: Abele, Metternich e Tisch (2019), adaptado e traduzido por Grotti (2019), atualização e classificação minha.

Figura 40 – Classificação da Fábrica do Futuro conforme Morfologia de Fábricas de Aprendizagem – dimensão de Propósito e objetivos

Propósito principal	Educação				Treinamento vocacional				Pesquisa									
Propósito secundário	Ambiente de testes / piloto			Produção industrial			Transferência de inovação			Reforço de imagem para a instituição								
Grupos-alvo para educação e treinamento	Alunos de escolas	Estudantes			Profissionais						Autônomos	Desempregados	Aberto ao público					
		Graduação	Mestrado	Doutorado	Aprendizes	Qualificados	Semi - qualificados	Não qualificados	Executivos									
									Baixa gestão	Média gestão				Alta gestão				
Constelação do grupo	Homogêneo						Heterogêneo (Nível de conhecimento, hierarquia, estudantes + profissionais etc.)											
Indústrias-alvo	Engenharia mecânica e de produção		Automotiva		Logística		Transportes		FMCG – Produtos de consumo rápido		Aeroespacial							
	Química		Eletrônica		Construção		Seguros / bancária		Têxtil		Outras							
Assuntos tratados no conteúdo dos treinamentos	Processo de criação de produtos		Eficiência de energia e de recursos		Produção global		Engenharia industrial		Indústria 4.0		Produção enxuta		Design		Outros			
Papel da Fábrica de Aprendizagem para pesquisa	Objeto de pesquisa						Instalações de pesquisa											
Tópicos de pesquisa	Processo de criação de produtos		Eficiência de energia e de recursos		Produção global		Engenharia industrial		Indústria 4.0		Produção enxuta		Design		Didática		Outros

Classificação da Fábrica do Futuro

Fonte: Abele, Metternich e Tisch (2019), adaptado e traduzido por Grotti (2019), atualização e classificação minha.

Figura 41 – Classificação da Fábrica do Futuro conforme Morfologia de Fábricas de Aprendizagem – dimensão de Processo

Ciclo de vida do produto	Planejamento do produto	Desenvolv. do produto	Prototipagem	Manufatura	Montagem	Logística	Serviços	Reciclagem	
Ciclo de vida da fábrica	Plan. de invest.	Conceito da fábrica	Plan. do processo	Ramp-up da produção	Manufatura	Montagem	Logística	Manutenção	Reciclagem
Ciclo de vida dos pedidos	Configuração e pedido	Sequenciam. do pedido	Plan. e programação da produção	Manufatura	Montagem	Logística	Coleta e embalagem	Remessa	
Ciclo de vida da tecnologia	Planejamento	Desenvolv.	Teste virtual	Manufatura	Montagem	Logística	Manutenção	Modernização	
Funções indiretas	Atividades primárias				Atividades secundárias				
	Logística de recebimento e expedição	Marketing e vendas	Serviços	Infraestrutura da empresa	Recursos Humanos	Desenvolvimento da tecnologia	Compras		
Fluxo de material	Produção em fluxo contínuo				Produção discreta				
Tipo de processo	Produção em massa		Produção seriada		Produção de pequenas séries		Produção de itens unitários		
Organização da manufatura	Manufatura em local fixo		Manufatura em bancada		Manufatura em oficina		Fluxo de produção		
Grau de automação	Manual			Parcialmente automatizada / automação híbrida			Totalmente automatizada		
Métodos de manufatura	Corte	Moldagem primária tradicional	Conformação	Combinação	Revestimento	Mudanças das propriedades dos materiais			
Tecnologia de manufatura	Física			Química			Biológica

Classificação da Fábrica do Futuro

Fonte: Abele, Metternich e Tisch (2019), adaptado e traduzido por Grotti (2019), atualização e classificação minha.

Figura 42 – Classificação da Fábrica do Futuro conforme Morfologia de Fábricas de Aprendizagem – dimensão de Estrutura

Ambiente de aprendizagem	Puramente físico (planejamento + execução)	Fábrica de aprendizagem física suportada por fábrica digital		Fluxo de valor físico da Fábrica de Aprendizagem estendido virtualmente		Puramente virtual (planejamento e execução)		
Escala do ambiente	Em menor escala				Tamanho natural			
Níveis de sistema de trabalho	Estação	Célula	Sistema	Segmento	Fábrica	Rede		
Facilitadores para a mutabilidade	Mobilidade		Modularidade		Compatibilidade		Escalabilidade	Universalidade
Dimensões de mutabilidade	Produto		Processo		Organização		Espaço físico e <i>layout</i>	
Integração de Tecnologia da Informação	TI antes do início de produção (CAD, CAM, simulação)			TI depois do início de produção (PCP, ERP, MES)		TI depois da produção (CRM, PLM)

Classificação da Fábrica do Futuro

Fonte: Abele, Metternich e Tisch (2019), adaptado e traduzido por Grotti (2019), atualização e classificação minha.

Figura 43 – Classificação da Fábrica do Futuro conforme Morfologia de Fábricas de Aprendizagem – dimensão de Produto

Materialidade	Material (produto físico)				Imaterial (serviço)	
Forma do produto	Carga geral		Carga a granel		Produtos de processo contínuo	
Origem do produto	Desenvolvimento próprio		Desenvolvido pelos participantes		Desenvolvimento externo	
Comercialização do produto	Disponível no mercado		Disponível no mercado, mas didaticamente simplificado		Não disponível no mercado	
Funcionalidade do produto	Produto funcional		Produto didaticamente simplificado com funcionalidade limitada		Sem funcionalidade, aplicado somente para demonstração	
Nº de produtos diferentes	1 produto	2 produtos	3 a 4 produtos	> 4 produtos	Flexível, desenvolvido pelos participantes	Aceitação de pedidos reais
Nº de variantes	1 variante	2 a 4 variantes	5 a 20 variantes	...	Flexível, dependendo dos participantes	Determinado pelos pedidos reais
Nº de componentes	1 componente	2 a 5 componentes	6 a 20 componentes	21 a 50 componentes	51 a 100 componentes	> 100 componentes
Uso posterior do produto	Reuso / reciclagem		Exposição / demonstração	Doação	Venda	Descarte

Classificação da Fábrica do Futuro

Fonte: Abele, Metternich e Tisch (2019), adaptado e traduzido por Grotti (2019), atualização e classificação minha.

Figura 44 – Classificação da Fábrica do Futuro conforme Morfologia de Fábricas de Aprendizagem – dimensão de Didática

Classes de competências	Competências técnicas e metodológicas		Competências sociais e de comunicação		Competências pessoais		Competências orientadas para ação e implementação	
Dimensões de aprendizado-alvo	Cognitivas			Afetivas			Psicomotoras	
Estratégia de cenário de aprendizagem	Instrução		Demonstração		Cenário fechado		Cenário aberto	
Tipo de ambiente de aprendizagem	Greenfield (desenvolvimento do ambiente da fábrica)				Brownfield (melhoria de ambiente de fábrica existente)			
Canal de comunicação	Aprendizado no local (no ambiente da fábrica)				Conexão remota (ao ambiente da fábrica)			
Grau de autonomia	Instruído			Autoguiado / autorregulado			Autodeterminado / auto-organizado	
Papel do instrutor	Apresentador		Moderador		Treinador		Instrutor	
Tipo de treinamento	Tutorial	Curso prático de laboratório		Seminário		Oficina		Project work
Padronização dos treinamentos	Treinamentos padronizados				Treinamentos customizados			
Fundamentação teórica	Pré-requisito	Antes (em bloco)		Alternando com etapas práticas		Baseado na demanda		Depois
Níveis de avaliação	Feedback dos participantes	Aprendizado dos participantes		Transferência para fábrica real		Impacto econômico dos treinamentos		Retorno dos treinamentos / Retorno sobre os investimentos
Avaliação do sucesso dos treinamentos	Teste de conhecimento (escrito)	Teste de conhecimento (oral)	Relatório escrito	Apresentação oral	Exame prático		Nenhum

Classificação da Fábrica do Futuro

Fonte: Abele, Metternich e Tisch (2019), adaptado e traduzido por Grotti (2019), atualização e classificação minha.

Figura 45 – Classificação da Fábrica do Futuro conforme Morfologia de Fábricas de Aprendizagem – dimensão de Métricas

Nº de participantes por treinamento	1 a 5 participantes	6 a 10 participantes	11 a 15 participantes	16 a 30 participantes	> 30 participantes
Nº de treinamentos padronizados	1 treinamento	2 a 4 treinamentos	5 a 10 treinamentos	> 10 treinamentos	
Duração média de cada treinamento	≤ 1 dia	> 1 dia ≤ 2 dias	> 2 dias ≤ 5 dias	> 5 dias ≤ 10 dias	> 10 dias ≤ 20 dias
Participantes por ano	< 50 participantes	50 a 200 participantes	201 a 500 participantes	501 a 1000 participantes	> 1000 participantes
Capacidade utilizada	< 10%	> 10 ≤ 20%	> 20 ≤ 50%	> 50 ≤ 75%	> 75%
Tamanho da Fábrica de Aprendizagem	≤ 100 m ²	> 100 ≤ 300 m ²	> 300 ≤ 500 m ²	> 500 ≤ 1000 m ²	> 1000 m ²
Funcionários na Fábrica de Aprendizagem	< 1	2 a 4	5 a 9	10 a 15	> 15

Classificação da Fábrica do Futuro

Fonte: Abele, Metternich e Tisch (2019), adaptado e traduzido por Grotti (2019), atualização e classificação minha.