UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DA ESCOLA POLITÉCNICA

LORENNNA FERNANDES LEAL

**Implementação de uma Fábrica de Aprendizagem com foco em Indústria 4.0:
Estudo de caso Fábrica do Futuro USP**

São Paulo
2020

LORENNNA FERNANDES LEAL

Implementação de uma Fábrica de Aprendizagem com foco em Indústria 4.0:
Estudo de caso Fábrica do Futuro USP

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como parte dos requisitos para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de
Produção

Orientador: Prof. Dr. Eduardo de Senzi
Zancul

Coorientador: Prof. Dr. Klaus Schützer

São Paulo
2020

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

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

São Paulo, 02 de Novembro de 2020

Assinatura do autor: Lorena F. Leal

Assinatura do orientador: E. Gonçalves

Catálogo-na-publicação

Fernandes Leal, Lorena

Implementação de uma Fábrica de Aprendizagem com foco em Indústria 4.0: Estudo de caso Fábrica do Futuro USP / L. Fernandes Leal -- versão corr. -- São Paulo, 2020.
138 p.

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

1. Indústria 4.0 2. Fábrica de Aprendizagem I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II. t.

AGRADECIMENTOS

À minha família, principalmente mãe, pai e irmão, pelo incentivo ao estudo desde os primeiros anos de vida e pelo apoio e recursos fornecidos para viabilizar meu estudo.

Aos companheiros da Universidade de São Paulo, pelo apoio na minha pesquisa e formação como pesquisadora, em especial ao Luiz Durão, que me apoiou desde que o mestrado era apenas um sonho.

Aos amigos de São Paulo, que me ajudaram a construir um lar em uma nova cidade.

Ao meu orientador, Eduardo Zancul, pela oportunidade, apoio e confiança.

RESUMO

Leal, L. F. (2020) *Implementação de uma Fábrica de Aprendizagem com foco em Indústria 4.0: Estudo de caso Fábrica do Futuro USP*. (Dissertação de Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo

A Indústria 4.0 promete ganhos de eficiência e qualidade, redução de tempos de desenvolvimento de novos produtos, enquanto possibilita maior flexibilidade e geração de novos modelos de negócio. A chamada 4ª Revolução Industrial tem como base a combinação de tecnologias já existentes de maneira inovadora, e ainda se apresenta em fase de desenvolvimento. Essa transformação aumenta a complexidade das operações de produção e demanda ainda a capacitação de mão de obra, bem como a transferência de tecnologia para a indústria e a demonstração de seus potenciais de aplicação. Nesse sentido, as Fábricas de Aprendizagem se apresentam como ambientes propícios ao desenvolvimento de tecnologia, suas aplicações, e transferência para indústria, bem como para a capacitação de mão de obra para a Indústria 4.0. Contudo, as Fábricas de Aprendizagem ainda se localizam principalmente em países desenvolvidos, concentradas majoritariamente no continente europeu, carecendo assim de exemplos de sua aplicação em ambientes distintos. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a implementação de uma Fábrica de Aprendizagem com foco em Indústria 4.0, por meio de um estudo de caso na Fábrica do Futuro, localizada no Centro de Inovação da USP (InovaUSP). Os resultados obtidos indicam a possibilidade de implementação de uma Fábrica de Aprendizagem em fases, nas quais recursos humanos e financeiros, operação e aplicação de ensino evoluem gradativamente, e cada fase contribui para a viabilização da fase seguinte.

Palavras-chave: Fábrica de Aprendizagem. Indústria 4.0. 4ª Revolução Industrial. Transferência de tecnologia. Ensino de Engenharia.

ABSTRACT

Leal, L. F. (2020) *Implementation of a Learning Factory with focus on Industry 4.0: Case study of Fábrica do Futuro USP* (Dissertação de Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo

Industry 4.0 promises efficiency and quality improvements, reduced time to market for new products, while allowing greater flexibility and the generation of new business models. The so-called 4th Industrial Revolution is based on the combination of already existing technologies in an innovative way, and is still being developed. This transformation increases the complexity of production operations and also demands the training of labor, as well as technology transfer to industry and the demonstration of its application potentials. In this sense, Learning Factories present themselves as environments with potential to the development and application of technology, as well as training and education for Industry 4.0 and research. However, Learning Factories are still located mainly in developed countries, mainly concentrated in the European continent, thus lacking examples of their application in different environments. Therefore, the present work aims to analyze the implementation of a Learning Factory with focus on Industry 4.0, through a case study at the Factory of the Future, located at the USP Innovation Center (InovaUSP). The results obtained indicate the possibility of implementing a Learning Factory in phases, in which human and financial resources, operation and application of teaching gradually evolve, and each phase contributes to the feasibility of the next phase.

Keywords: Learning factory. Industry 4.0. 4th Industrial Revolution. Technology transfer. Engineering Teaching.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição de documentos sobre Fábricas de Aprendizagem por país	15
Figura 2: Detalhamento das quatro Revoluções Industriais	21
Figura 3: Integração Horizontal, Vertical e de Ponta a Ponta	29
Figura 4: Serviços fornecidos pela Computação em Nuvem	32
Figura 5: Distribuição de documentos sobre Fábricas de Aprendizagem por país	38
Figura 6: Trabalhos que abordam o tema de Fábrica de Aprendizagem por ano	38
Figura 7: Principais fontes de trabalhos sobre Fábricas de Aprendizagem provenientes de Congressos	39
Figura 8: Características e Classificação possíveis para uma Fábrica de Aprendizagem	45
Figura 9: Morfologia de Fábricas de Aprendizagem	46
Figura 10: Dimensão Modelo Operacional da Morfologia de uma Fábrica de Aprendizagem	47
Figura 11: Dimensão Objetivo de uma Fábrica de Aprendizagem	48
Figura 12: Dimensão Processo de uma Fábrica de Aprendizagem	49
Figura 13: Dimensão Configuração de uma Fábrica de Aprendizagem	50
Figura 14: Dimensão Produto de uma Fábrica de Aprendizagem	50
Figura 15: Dimensão Didática de uma Fábrica de Aprendizagem	52
Figura 16: Dimensão Métricas de uma Fábrica de Aprendizagem	52
Figura 17: Três níveis conceituais para um Fábrica de Aprendizagem	53
Figura 18: Documentos que abordam o tema de Fábrica de Aprendizagem em Indústria 4.0 por ano	54
Figura 19: Etapas da pesquisa de Estudo de caso	57
Figura 20: Tipos de Estudo de caso	58
Figura 21: Fachadas traseira e frontal do prédio InovaUSP	65
Figura 22: Planta baixa e localização da Fábrica do Futuro e escritórios	65
Figura 23: Processo de produção do skate	69
Figura 24: Demonstradores de Localização <i>indoors</i> e QR Code para controle de qualidade e estoque	69
Figura 25: Demonstrador de Produto customizado	69
Figura 26: Demonstrador de Manufatura Aditiva e Manufatura Distribuída	70
Figura 27: Demonstrador de Visão computacional para controle de qualidade	70

Figura 28: Gravação de material para mídia na primeira versão da Fábrica do Futuro	70
Figura 29: <i>Hubs</i> da Fábrica do Futuro	71
Figura 30: Planta da Fábrica do Futuro e localização demonstradores	77
Figura 31: Sala de aula da Fábrica do Futuro.....	78
Figura 32: Skate padrão da Fábrica do Futuro	79
Figura 33: Componentes do skate	80
Figura 34: Processo de montagem o skate.....	81
Figura 35: Linha de montagem e as Estações de Trabalho 1 a 5.....	81
Figura 36: Fluxos de montagem e abastecimento definidos originalmente	82
Figura 37: Estação de Trabalho 1 - Montagem <i>shapes</i> e <i>trucks</i>	83
Figura 38: Estação de Trabalho 2 – Montagem das rodinhas	83
Figura 39: Estação de Trabalho 3 – Aplicação do torque	84
Figura 40: Estação de Trabalho 4 – Montagem de itens opcionais	84
Figura 41: Estação de desmontagem.....	85
Figura 42: Armário fixo e armário móvel para estocagem de componentes	85
Figura 43: Armário móvel para o estoque de produtos acabados e carrinho de <i>milkrun</i>	85
Figura 44: Skate montado com todos os itens opcionais.....	87
Figura 45: Skate desmontado com todos os itens opcionais	87
Figura 46: Organização de acesso aos softwares MES e ERP.....	88
Figura 47: Estação de Trabalho 4 com placa Labrador destacada em vermelho.....	89
Figura 48: Etapas do configurador de produto	90
Figura 49: Configurador de produto no tablet	90
Figura 50: Integração entre os sistemas MES e ERP desde o pedido até a montagem	91
Figura 51: Estação de Trabalho 2 e componentes de visão computacional	92
Figura 52: Câmera inteligente	93
Figura 53: Aplicativo de visão computacional	93
Figura 54: Integração entre a aplicação de visão computacional e o sistema MES ..	94
Figura 55: Cálculo da velocidade e distância percorrida.....	95
Figura 56: Luzes LED instaladas no skate	95
Figura 57: Identificação da posição e orientação do skate.....	96
Figura 58: Demonstrador do Produto conectado	96

Figura 59: Aplicação de realidade aumentada	97
Figura 60: Controle remoto da impressora 3D.....	98
Figura 61: Produção de <i>rails</i> por manufatura aditiva.....	99
Figura 62: Impressoras 3D da Fábrica do Futuro.	100
Figura 63: Softwares utilizados na Fábrica do Futuro ao longo do ciclo de vida do produto.....	101
Figura 64: Integração do <i>Digital Twin</i> com os demais softwares.....	102
Figura 65: Impressoras de QR Code e RFID e leitores de QR Code	103
Figura 66: Estação de Trabalho 1 com impressora e leitor de QR Code.....	103
Figura 67: Relação entre a Fábrica do Futuro e o <i>hub</i> no Insper.....	104
Figura 68: Versão reduzida e tamanho real do Demonstrador 8.....	105
Figura 69: Separação de componentes por visão computacional.....	106
Figura 70: Alunos do curso de Planejamento e Controle da Produção.....	107
Figura 71: Alunos do curso de Ergonomia I	108
Figura 72: Alunos do curso de Introdução à Engenharia Elétrica	108
Figura 73: Classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Modelo de operação.	112
Figura 74: Classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Objetivos e metas.	113
Figura 75: Classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Processo.....	114
Figura 76: Classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Configuração.....	115
Figura 77: Classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Produto.	116
Figura 78: Classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Didática	117
Figura 79: Classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Métricas.	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distribuição das Fábricas de Aprendizagem membros da IALF por país...	16
Tabela 2: Definição de Indústria 4.0 por diferentes autores	23
Tabela 3: Comparação entre um produto convencional e um produto para Fábrica de Aprendizagem	51
Tabela 4: Táticas para garantia da validade dos construtos, validade interna, validade externa e confiabilidade no Estudo de caso.....	59
Tabela 5: Fontes de evidência para Estudo de caso.....	60
Tabela 6: Visão geral do Estudo de caso e protocolo de pesquisa.....	62
Tabela 7: Características da 1ª fase de implementação da Fábrica do Futuro.....	68
Tabela 8: Características da 2ª fase de implementação da Fábrica do Futuro.....	73
Tabela 9: Características da 3ª fase de implementação da Fábrica do Futuro.....	75
Tabela 10: Variáveis e parâmetros de customização do skate.....	86
Tabela 11: Comparação entre os três modelos de impressora 3D da Fábrica do Futuro.....	99
Tabela 12: Aplicações didáticas na Fábrica do Futuro.....	110
Tabela 13: Visão geral da Fábrica do Futuro como Fábrica de Aprendizagem no sentido restrito	111
Tabela 14: Tecnologias de Indústria 4.0 abordadas nos Demonstradores da Fábrica	120
Tabela 15: Dimensões da Fábrica do Futuro em cada fase.....	124

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. <i>A Quarta Revolução Industrial</i>	<i>12</i>
1.2. <i>Lacuna de conhecimento e objetivo do trabalho.....</i>	<i>17</i>
1.3. <i>Estrutura da dissertação</i>	<i>18</i>
2. REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1. <i>Indústria 4.0.....</i>	<i>19</i>
2.2. <i>Tecnologias habilitadoras para a Indústria 4.0.....</i>	<i>25</i>
2.2.1. <i>Robôs Industriais Autônomos (AIR)</i>	<i>25</i>
2.2.2. <i>Inteligência Artificial (AI)</i>	<i>26</i>
2.2.3. <i>Simulações</i>	<i>27</i>
2.2.4. <i>Integração de sistemas.....</i>	<i>28</i>
2.2.5. <i>Internet das Coisas.....</i>	<i>29</i>
2.2.6. <i>Cibersegurança</i>	<i>30</i>
2.2.7. <i>Computação em Nuvem (Cloud Computing)</i>	<i>31</i>
2.2.8. <i>Big Data Analytics.....</i>	<i>32</i>
2.2.9. <i>Manufatura Aditiva.....</i>	<i>33</i>
2.2.10. <i>Realidade Aumentada.....</i>	<i>34</i>
2.3. <i>Impactos da Indústria 4.0 em termos de produto.....</i>	<i>34</i>
2.4. <i>Fábricas de Aprendizagem.....</i>	<i>37</i>
2.4.1. <i>Visão geral da literatura sobre Fábricas de Aprendizagem.....</i>	<i>37</i>
2.4.2. <i>Surgimento e evolução das Fábricas de Aprendizagem.....</i>	<i>40</i>
2.4.3. <i>Definição e objetivo de Fábricas de Aprendizagem.....</i>	<i>43</i>
2.4.4. <i>Estrutura e morfologia de Fábricas de Aprendizagem</i>	<i>45</i>
3. METODOLOGIA DE PESQUISA.....	55
3.1. <i>Projeto do Estudo de caso.....</i>	<i>57</i>
3.2. <i>Preparação, Coleta de dados, Análise de evidências e Relatório do caso</i>	<i>59</i>
4. RESULTADOS	64
4.1. <i>Contexto e visão geral.....</i>	<i>64</i>
4.2. <i>Etapas de implementação.....</i>	<i>66</i>
4.2.1. <i>Fase 1 – Concepção e Teste de conceito</i>	<i>66</i>

4.2.2. Fase 2 – Implementação	71
4.2.3. Fase 3 – Consolidação	74
4.3. <i>Demonstradores de tecnologias e conceitos de Indústria 4.0</i>	76
4.3.1. Produto demonstrador: skate conectado	78
4.3.2. Linha de montagem do skate.....	80
4.3.3. D1 - Montagem customizada	86
4.3.4. D2 - Controle de qualidade por visão computacional	91
4.3.5. D3 - Produto conectado	94
4.3.6. D4 - Manufatura aditiva e Monitoramento remoto	98
4.3.7. D5 - <i>Digital Twin</i>	101
4.3.8. D6 - Identificação de componentes	102
4.3.9. D7 - Monitoramento de máquinas e Manufatura distribuída.....	104
4.3.10. D8 - Separação de componentes por visão computacional	104
4.4. <i>Aplicações didáticas na Fábrica do Futuro</i>	106
4.5. <i>Definição e Classificação Morfológica da Fábrica do Futuro</i>	110
4.5.1. Dimensão Modelo de operação.....	111
4.5.2. Dimensão Objetivos e Metas	112
4.5.3. Dimensão Processo	114
4.5.4. Dimensão Configuração	115
4.5.5. Dimensão Produto	115
4.5.6. Dimensão Didática.....	116
4.5.7. Dimensão Métricas	118
5. DISCUSSÃO	119
5.1. <i>Análise da Fábrica do Futuro em relação à Indústria 4.0 e suas tecnologias</i> 119	
5.2. <i>Análise da implementação da Fábrica do Futuro em relação à Fábricas de Aprendizagem</i>	122
6. CONCLUSÃO	128
REFERÊNCIAS	131

1. INTRODUÇÃO

1.1. A Quarta Revolução Industrial

A Quarta Revolução Industrial, também conhecida sob o termo Indústria 4.0, pode ser entendida como o movimento de digitalização da indústria e tem como base os sistemas físico-cibernéticos (*cyber-physical system*) (Nagy, Oláh, Erdei, Máté & Popp, 2018). “Os sistemas físico-cibernéticos basicamente significam que todo o processo de produção até o consumo está em comunicação entre si” (Baygin, Yetis, Karakose & Akin, 2016, p.1). Esses sistemas se integram digitalmente em eixos horizontal (processos produtivos e/ou cadeia de valor) e vertical (diferentes níveis da empresa) e funcionam de maneira inteligente (Ghobakhloo, 2018). Nas fábricas, a integração de máquinas e produtos em rede permite o funcionamento inteligente e autônomo (por vezes parcialmente) da produção, que requer intervenções manuais mínimas (Erol, Jäger, Hold, Ott, & Sihm, 2016).

Nessas redes de produção digitalizada, os nódulos são as fábricas inteligentes que se conectam à rede da cadeia de valor em que se encontram inseridas (Erol et al., 2016). Materiais e produtos são identificáveis de maneira única, localizáveis dentro das fábricas e ao longo do seu ciclo de vida e, juntamente com as máquinas inteligentes, garantem o funcionamento autônomo da produção (Erol et al., 2016; Hecklau, Galeitzke, Flachs & Kohl, 2016). As fábricas inteligentes oferecem processos produtivos flexíveis, com capacidade de adaptação e de resolução de problemas que emergem em um mundo de complexidade crescente (Cimini, Pezzotta, Pinto & Cavalieri, 2018)

“Entre outras características, o I4.0 promove interoperabilidade autônoma, agilidade, flexibilidade, tomada de decisão, eficiência ou redução de custos” (Alcácer & Cruz-Machado, 2019, p.901). A Indústria 4.0 promete ganhos de eficiência e qualidade, redução do tempo de desenvolvimento de novos produtos (*time to market*), enquanto possibilita maior flexibilidade e agilidade, e ainda geração de novos modelos de negócio, como aqueles baseados na individualização sob demanda (Cimini et al., 2018; Erol et al., 2016; Lasi, Fettke, Kemper, Feld & Hoffmann, 2014; Olsen & Tomlin, 2020).

As três primeiras revoluções industriais se caracterizaram, particularmente, pela disrupção dos paradigmas por meio da adoção de tecnologias dominantes de

propósito geral: máquina a vapor, energia elétrica e avanços de automação e eletrônica. A Quarta Revolução Industrial, por sua vez, compreende diversas tecnologias habilitadoras específicas, muitas já existentes há décadas, e teve sua concepção e promoção a partir de iniciativas e políticas governamentais com o objetivo de aumentar a produtividade e competitividade de suas indústrias (Cimini et al., 2018; Ghobakhloo, 2018).

As mudanças prometidas pela Indústria 4.0 em termos de digitalização têm potencial de aumentar a complexidade tecnológica e organizacional das empresas (Erol et al., 2016; Wank et al., 2016). Consequentemente, surgem desafios na adoção da Indústria 4.0 que não se limitam apenas à aquisição de novas tecnologias e investimentos financeiros, mas também à qualificação de pessoal em todos os níveis organizacionais necessários para a conduzir a implementação das novas tecnologias e lógica produtiva (Erol et al., 2016; Hecklau et al., 2016).

As tecnologias da Indústria 4.0, suas aplicações, e sua consequente complexidade de implementação geram ceticismo e cautela. Nesse sentido, os benefícios oferecidos pela Indústria 4.0 precisam ser devidamente demonstrados e avaliados (Wank et al., 2016). Ainda que os benefícios sejam identificados, permanecem dificuldades em termos de entendimento do fenômeno e das etapas necessárias para a transição (Ghobakhloo, 2018). Wank et al. (2016) concluem que, para a efetiva disseminação dos potenciais da digitalização da indústria (especialmente para pequenas e médias empresas), se torna essencial:

- Aumentar a conscientização sobre os benefícios (...);
- Analisar potenciais benefícios (...);
- Permitir a implementação individual dentro de sua própria empresa (...);
- Avaliar benefícios e esforços para a digitalização. (p.94)

É esperado que a Indústria 4.0 repercuta também no mercado de trabalho, extinguindo algumas profissões, enquanto cria outras completamente novas, além de gerar impactos no perfil de profissões já existentes, como a Engenharia (Erol et al., 2016; Ghobakhloo, 2018). Desde o princípio das discussões sobre a Indústria 4.0, foi identificado como um dos pontos prioritários o treinamento da mão de obra: “(...) isso trará novos desafios para a formação profissional e acadêmica e para o desenvolvimento profissional contínuo” (Kagermann, Wahlster & Helbig, 2013, p. 55).

As mudanças tecnológicas têm impacto em termos de perfil e competência dos cargos, bem como na organização do trabalho (Jerman, Bach & Bertoncelj, 2018). Criatividade, inovação e comunicação ganham maior relevância quando atividades rotineiras passam a ser total ou parcialmente realizadas por máquinas (Erol et al., 2016). Profissionais com múltiplas habilidades e flexibilidade para se adaptar às tecnologias que possam emergir são requeridos no processo de digitalização (Ghobakhloo, 2018). Hecklau et al. (2016) apontam a necessidade de competências criativas, estratégicas e de gestão como consequência do aumento da responsabilidade dos profissionais, dada a automatização de funções operacionais. Considerando as necessidades de formação de competências para a Indústria 4.0, as Fábricas de Aprendizagem se tornam um recurso conveniente para a transferência de tecnologia e conhecimento (Erol et al., 2016).

Surgidas ainda na década de 90, as Fábricas de Aprendizagem se consolidaram como um relevante instrumento de ensino (especialmente em Engenharia), oferecendo experiência prática, ensino baseado em ação, bem como interação com a indústria e desenvolvimento de pesquisa acadêmica. Esses ambientes de aprendizagem replicam os processos produtivos e tecnologias de um ambiente industrial, de maneira a proporcionar aprendizado prático a partir da interação com um processo produtivo realístico (Abele, Metternich & Tisch, 2019). As Fábricas de Aprendizagem podem possuir diferentes objetivos, entre eles a demonstração de tecnologias, parceria com a indústria, desenvolvimento de produto, pesquisa acadêmica, educação continuada, entre outros (Lamancusa, Zayas, Soyster, Morell & Jorgensen, 2008; Abele et al., 2019). Essas Fábricas possuem um componente físico que representa o processo produtivo, o produto, a configuração, etc. e um componente didático, que incluem as atividades de ensino e pesquisa (Abele et al., 2017; Abele et al., 2019). Nos últimos anos, diversas Fábricas de Aprendizagem têm abordado o tema Indústria 4.0. (Abele et al., 2019; Baena, Guarín, Mora, Souza & Retat, 2017; Elbestawi, Centea, Singh, & Wanyama 2018; Enke et al., 2018; Rauch, Morandell & Matt, 2019).

As Fábricas de Aprendizagem, portanto, demonstram potencial para: 1. Ensino prático de engenharia, mantendo maior flexibilidade e capacidade de adaptação da academia; 2. Parceria com a indústria, que viabiliza maior capacitação profissional em vista de desafios reais do mercado do trabalho; 3. Oportunidade de pesquisa e desenvolvimento de soluções reais para a indústria, bem como desenvolvimento

acadêmico, envolvendo graduandos, pós-graduandos e acadêmicos; 4. Oportunidade de desenvolvimento e transferência de tecnologia para a indústria, e ainda, atualização profissional de profissionais atuantes (educação continuada); 5. Geração de novos negócios. A flexibilidade oferecida pelas Fábricas de Aprendizagem permite a atualização frequente de suas instalações e tecnologias, bem como de seus conteúdos de ensino e pesquisa. Do ponto de vista da Indústria 4.0, uma revolução ainda em andamento, essa flexibilidade é essencial para a formação constante de profissionais atualizados nas mais recentes tecnologias e aplicações. (Abele et al., 2019; Baena et al., 2017; Elbestawi et al., 2018; Enke et al., 2018; Rauch et al., 2019)

Apesar dos potenciais apresentados pelas Fábricas de Aprendizagem em termos de pesquisa, ensino, transferência de tecnologia, geração de novos negócios, entre outros, ainda existem poucas Fábricas de Aprendizagem em países em desenvolvimento. Wagner, AlGeddawy, ElMaraghy e Müller (2012) afirmam que uma razão para tal seria o alto custo de instalação e operação de Fábricas de Aprendizagem. Porém, os autores afirmam ainda que “existem muitas variantes mais simples ou limitadas em muitos outros países que são muito úteis em termos de educação, pesquisa e desenvolvimento industrial” (Wagner et al. 2012, p.114). Uma busca no repositório *Web of Science*, pelas palavras-chave "*Learning Factory*" OR "*Learning factories*" apresenta como resultado 260 documentos e possibilita identificar a concentração da literatura de Fábricas de Aprendizagem em países desenvolvidos, principalmente Alemanha e Áustria (Figura 1).

Figura 1: Distribuição de documentos sobre Fábricas de Aprendizagem por país

Fonte: *Web of Science*

A associação de Fábricas de Aprendizagem *International Association of Learning Factories* (IALF - Associação Internacional de Fábricas de Aprendizagem, em português), apresenta em sua lista de 16 membros (Tabela 1): 81% localizados no continente europeu (Áustria, Alemanha, Luxemburgo, Croácia, Grécia, Bósnia e Herzegovina); 75% em países de economia avançada¹ (Áustria, Alemanha, Luxemburgo, Grécia, EUA); apenas 25% em países de economia em desenvolvimento¹ (Croácia, Bósnia e Herzegovina, África do Sul, Malásia), nenhum deles no continente americano; e 44% localizadas apenas na Alemanha. Ou seja, a literatura e a prática sobre Fábricas de Aprendizagem se concentram em países desenvolvidos, especialmente europeus.

Tabela 1: Fábricas de Aprendizagem membros da IALF por país e continente

Fábrica de Aprendizagem	Instituição de ensino	País	Continente
Center for industrial Productivity (CiP)	Technical University Darmstadt	Alemanha	Europa
Lean Learning Factory	University of Split	Croácia	Europa
LMS Learning Factory	University of Patras	Grécia	Europa
Learning Factory / Pilot-Factory Industrie 4.0	Vienna University of Technology	Áustria	Europa
LPS Learning Factory	Ruhr-Universität Bochum	Alemanha	Europa
LEAD Factory	Graz University of Technology	Áustria	Europa
FSRE Learning Factory	University of Mostar	Bósnia e Herzegovina	Europa
Intelligent Learning Factory (ILF)	Purdue University	EUA	América
Learning Factory for Optimal Machining (loz)	Technical University Munich	Alemanha	Europa
Stellenbosch Learning Factory (SLF)	Stellenbosch University	África do Sul	África
ESB Logistics Learning factory	Reutlingen University	Alemanha	Europa

¹ Lista do FMI, outubro de 2019 (FMI, 2019)

Learning Factory Global Production	Karlsruhe Institute of Technology	Alemanha	Europa
Die Lernfabrik The Learning Factory	Technische Universität Braunschweig	Alemanha	Europa
Lernfabrik für Schlanke Produktion (LSP)	Technical University Munich	Alemanha	Europa
Operational Excellence Laboratory	Université du Luxembourg	Luxemburgo	Europa
FIM Learning Factory	Faculty of Industrial Management Universiti Malaysia Pahang	Malásia	Ásia

Fonte: IALF - International Association of Learning Factories

1.2. *Lacuna de conhecimento e objetivo do trabalho*

Tendo em consideração a discussão anteriormente apresentada, é possível observar que existem ainda lacunas na literatura das Fábricas de Aprendizagem de Indústria 4.0, a saber:

- A literatura sobre Fábricas de Aprendizagem é centrada em países desenvolvidos, principalmente em países europeus. Ou seja, existe uma lacuna de implementação do conceito em países em desenvolvimento, que apresentam limitação de recursos, inclusive no Brasil;
- A Indústria 4.0 é um conceito recente, ainda em fase de desenvolvimento de aplicações, que demanda treinamento de mão de obra qualificada; ou seja, é recente o fenômeno de uso de Fábricas de Aprendizagem para pesquisa, ensino e transferência de tecnologias da Indústria 4.0;
- O conceito de Indústria 4.0 ainda causa ceticismo e preocupação na indústria; ou seja, existe a necessidade de transferência de tecnologia, demonstração de uso, bem como de transferência de conhecimento para a indústria, em especial aquelas menos desenvolvidas e que não se encontram no epicentro dos desenvolvimentos de Indústria 4.0.

O presente trabalho, tendo como foco o componente físico e estrutural da Fábrica, bem como seu papel na transferência de tecnologia e, considerando ainda

as lacunas de conhecimento anteriormente apresentadas, possui como objetivo **analisar a implementação de uma Fábrica de Aprendizagem com foco em Indústria 4.0**, respondendo às seguintes questões de pesquisa:

1. Como a implementação de uma Fábrica de Aprendizagem para demonstração de tecnologias, ensino e pesquisa de Indústria 4.0, pode ser organizada em fases de evolução, em termos de configuração física, recursos financeiros e humanos, operação, e aplicações no ensino?
2. Quais as aplicações possíveis da Fábrica de Aprendizagem por fase de implementação?
3. Como a estrutura da Fábrica de Aprendizagem implementada segundo as fases adotadas se compara em relação à literatura vigente nas áreas de Fábrica de Aprendizagem e de Indústria 4.0?

1.3. Estrutura da dissertação

O presente trabalho se divide da seguinte forma: o 1º capítulo discute o contexto no qual o trabalho se insere e sua motivação, lacuna de conhecimento e objetivo; o 2º capítulo revisa a literatura vigente sobre Indústria 4.0 e suas tecnologias habilitadores e sobre as Fábricas de Aprendizagem; o 3º capítulo apresenta a metodologia do trabalho e o protocolo de pesquisa; o 4º capítulo apresenta o resultados; e o 5º capítulo apresenta a análise da implementação da Fábrica de Aprendizagem e o 6º capítulo apresenta a conclusão do trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção apresenta a literatura existente e se divide em quatro blocos, a saber: 1. Indústria 4.0, que apresenta uma visão do conceito de Indústria 4.0, seu surgimento e evolução e tecnologias habilitadoras (Seção 2.1); 2. Tecnologias habilitadoras para a Indústria 4.0 (Seção 2.2); 3. Impactos da Indústria 4.0 em termos de produto (Seção 2.3); e 4. Fábricas de Aprendizagem, seu surgimento, evolução e situação atual (Seção 2.4).

2.1. Indústria 4.0

O avanço das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) foi significativo nas últimas décadas, transformando todas as esferas da vida humana. A miniaturização dos computadores, aumento da capacidade de processamento, o avanço da Internet e, como consequência, da Computação em Nuvem, tornaram possível a computação ubíqua, ou seja, a onipresença dos sistemas de informação e comunicação (Kagermann et al., 2013). Sistemas embarcados, constituídos por microcomputadores autônomos, conectam-se à Internet e entre si, e estão cada vez mais presentes em objetos do dia-a-dia, sendo conhecido como Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*). Ainda segundo os autores, a IoT permite a criação de redes que incorporam todo o processo produtivo, possibilitando o estabelecimento de ambientes inteligentes de produção. Esta convergência do mundo virtual com o mundo físico resulta nos sistemas físico-cibernéticos (CPS, do inglês *Cyber-Physical Systems*).

Esses avanços têm impacto direto na indústria, proporcionando mudanças significativas, o que é conhecido pelo termo “Indústria 4.0” (Kagermann et al., 2013; Nagy et al., 2018). O termo foi cunhado originalmente na Alemanha como uma iniciativa que visa manter a competitividade da indústria alemã. A “Indústria 4.0” descreve a mudança de paradigma impulsionada pelos avanços da digitalização na indústria, por meio da incorporação dos sistemas físico-cibernéticos. Kagermann et al. (2013) descrevem como possibilidade futura: “No ambiente de fabricação, esses sistemas físico-cibernéticos compreendem máquinas inteligentes, sistemas de armazenamento e instalações de produção capazes de trocar informações de forma autônoma, desencadeando ações e controlando-se independentemente” (p.5). Os

sistemas físico-cibernéticos possibilitarão o desenvolvimento de processos e produtos inteligentes e, como consequência, de fábricas inteligentes, nas quais sistemas de produção físicos e virtuais serão capazes de cooperar globalmente e de maneira flexível (Kagermann et al., 2013; Schwab, 2016).

Segundo Kagermann et al. (2013), nessas fábricas, máquinas, produtos, recursos e seres humanos se comunicarão naturalmente e serão capazes de gerenciar a complexidade e fabricar com maior eficiência. Os produtos inteligentes carregam e transmitem informações sobre seu próprio histórico, status, e podem ser localizados o tempo todo em qualquer ponto do processo produtivo. Nesse novo contexto, os sistemas de manufatura com tecnologia embarcada se conectam verticalmente aos outros processos do negócio e horizontalmente com toda a cadeia de valor, desde o pedido até a entrega, podendo ser gerenciados em tempo real. As fábricas inteligentes serão compostas por redes de recursos de fabricação (robôs, máquinas, instalações de produção etc.), possivelmente dispersos geograficamente (manufatura distribuída), que respondem a diferentes situações de maneira autônoma, baseada em dados e de modo autoconfigurável, equipados com sensores e incorporados aos principais sistemas de gestão e planejamento do negócio (Kagermann et al., 2013).

Ainda segundo Kagermann et al. (2013), a mudança nos processos produtivos e nas cadeias de valor seria tão significativa que caracterizaria uma nova revolução industrial. A primeira revolução industrial, no século 18, se caracterizou pelo surgimento de equipamentos de produção mecânica (máquina à vapor), que revolucionaram a produção de bens de consumo. Em torno do século XX, a produção em massa com base na divisão do trabalho e a introdução de máquinas elétricas foram responsáveis pela segunda revolução industrial. A terceira revolução industrial, já nos anos 1970, incorporou as tecnologias da informação e a eletrônica na automação dos processos de fabricação, substituindo principalmente o trabalho manual nas linhas de produção (Kagermann et al., 2013; Schwab, 2016).

A inovação trazida pela Quarta Revolução Industrial não se traduz em uma nova tecnologia, mas sim em diferentes combinações de tecnologias já existentes de maneira inovadora (Drath & Horch, 2014). “A escala e escopo das mudanças explicam porque as rupturas e as inovações atuais são tão significantes” (Schwab, 2016, p.18). Ainda de acordo com Schwab (2016), essas mudanças se caracterizam como uma nova revolução industrial devido a três fatores: velocidade, pois evolui em ritmo mais

acelerado que as revoluções anteriores; amplitude/profundidade, pois combina diferentes tecnologias e traz mudanças sem precedentes para a economia, negócios, sociedade e para os indivíduos; e impacto sistêmico, pois transforma sistemas inteiros nos níveis empresarial, industrial, dentro de países e entre países, e também no nível da sociedade. Lee et al. (2018) afirmam que: “... se a Primeira e a Segunda Revolução Industrial modernizaram o espaço físico, e a Terceira Revolução Industrial modernizou no ciberespaço, a Quarta Revolução Industrial provocou uma fusão do espaço físico com o ciberespaço” (p.6). A Figura 2 ilustra as quatro Revoluções Industriais.

Figura 2: Detalhamento das quatro Revoluções Industriais

Fonte: Adaptado de Kagermann et al. (2013) e Drath e Horch (2014)

Segundo Drath e Horch (2014), a Indústria 4.0 viabiliza novas oportunidades de serviços, produtos e negócios que surgem das combinações de tecnologias. Lasi et al. (2014) afirmam que a combinação da digitalização com os avanços em termos de objetos inteligentes (máquinas e produtos), resultam em uma mudança significativa para a indústria. A Indústria 4.0 promete ainda ganhos de eficiência e qualidade, redução do tempo de lançamento de novos produtos no mercado, enquanto permite maior flexibilidade na produção e a geração de novos modelos de negócios, como os baseados na personalização sob demanda (Cimini et al., 2018; Hermann, Pentek & Otto, 2016; Lasi et al., 2014).

Lasi et al. (2014) afirmam que as mudanças trazidas pela Indústria 4.0 derivam de duas direções: puxada por demandas sociais, econômicas e políticas; e empurrada pela tecnologia. Os autores listam algumas destas demandas: redução no tempo de desenvolvimento de produtos como resultado da competição; individualização sob demanda, ou personalização, que pode incluir até mesmo lotes únicos de produção; flexibilidade no desenvolvimento de produto e na produção; descentralização para tomada de decisão mais ágil, reduzindo hierarquias; e eficiência no uso de recursos devido a questões ecológicas de sustentabilidade. Em termos de tecnologia, os autores listam: aumento da mecanização e automação; digitalização e uso de redes na produção; e miniaturização. Os autores destacam ainda que a Indústria 4.0 traz desafios em se tratando de engenharia de sistemas de informação e negócios, relativos à integração dos novos sistemas entre si, mas também com os sistemas de informação já existentes de gestão de produção como o MES (*Manufacturing Execution Systems*), de gestão de recursos empresariais como o ERP (*Enterprise Resource Planning Systems*), entre outros.

Segundo Schuh, Anderl, Gausemeier, ten Hompel, & Wahlster (2017), as empresas apenas conseguirão atingir todo o potencial da Indústria 4.0 se forem capazes de responder às demandas dinâmicas do mercado de maneira ágil: “agilidade denota a capacidade de implementar mudanças na empresa em tempo real, incluindo mudanças sistêmicas fundamentais no modelo de negócios da empresa, por exemplo” (p.11). Para garantir a capacidade de responder rapidamente às mudanças de mercado, reduzir o tempo de desenvolvimento de produtos até a inserção no mercado, bem como desenvolver soluções “sob medida” para os clientes, alguns atributos serão essenciais, em especial, a capacidade de coletar e processar grandes quantidades de dados, preferencialmente em tempo real, que acelere o processo de tomada de decisão da empresa.

De acordo com Ghobakhloo (2018), para garantir a agilidade e flexibilidade do negócio, alguns atributos devem ser incorporados ao sistema produtivo. A modularidade, no lugar da rigidez e linearidade dos sistemas produtivos, garante a capacidade de adaptação da produção às mudanças demandas pelo mercado. A integração de sistemas e interoperabilidade garantem um fluxo contínuo de dados e informações entre os sistemas e equipamentos, garantindo mais agilidade na tomada de decisão descentralizada, permitindo a autorregulação de sistemas e mecanismos de controle inteligentes. A virtualização do sistema produtivo permite o uso de dados

coletados por sensores para aplicação de simulações para otimização da produção sem a interrupção dos processos físicos. Os produtos inteligentes tem ainda papel relevante nesse contexto, ao coletar e transferir dados e informações aos outros componentes do sistema ao longo do seu ciclo de vida, desde a produção. Estes elementos agregados possibilitam atuação da fábrica de maneira inteligente, na qual produtos, materiais, máquinas se conectam e podem ser otimizados para a redução de desperdícios, defeitos e ociosidade no sistema produtivo.

Alguns autores, como Ghobakhloo (2018) e Liao, Deschamps, Loures e Ramos (2017), afirmam que a definição da Indústria 4.0 pode ser feita com base em seus princípios de design e tendências tecnológicas. A Tabela 2 traz algumas definições recentes para a Indústria 4.0 por diferentes autores.

Tabela 2: Definição de Indústria 4.0 por diferentes autores

Autor	Definição de Indústria 4.0
Erol et al., 2016	“Conceitos recentes como Internet das Coisas, Internet Industrial, Manufatura Baseada em Nuvem e Manufatura Inteligente abordam essa visão de produção futura habilitada digitalmente e são geralmente incluídos no conceito visionário de uma Quarta Revolução Industrial ou Indústria 4.0. Todos esses conceitos estão relacionados a desenvolvimentos tecnológicos recentes, nos quais a Internet e as tecnologias de suporte (por exemplo, sistemas embarcados) servem como espinha dorsal para integrar agentes, materiais, produtos, linhas de produção e processos humanos e de máquinas dentro e além dos limites organizacionais para formar um novo tipo de cadeia de valor inteligente, conectada e ágil.” (p.13)
Hecklau et al., 2016	“O conceito da Indústria 4.0 descreve a digitalização crescente de toda a cadeia de valor e a interconexão resultante de pessoas, objetos e sistemas por meio da troca de dados em tempo real. Como resultado dessa interconexão, produtos, máquinas e processos são equipados com Inteligência Artificial e permitem a adaptação independente às mudanças espontâneas do ambiente. Além disso, objetos inteligentes são incorporados a sistemas mais amplos, o que aprimora a criação de sistemas de produção flexíveis e com autocontrole.” (p.2)
Baygin et al., 2016	“A Indústria 4.0 visa principalmente reunir tecnologia da informação e indústria. Em outras palavras, a Indústria 4.0 pode ser definida como fábricas inteligentes.” (p.2)
Motyl et al., 2017	“A Indústria 4.0 é conhecida anteriormente como a Quarta Revolução Industrial, uma revolução baseada no uso de sistemas físico-cibernéticos - CPS. (...) A visão compartilhada sobre a estrutura da Indústria 4.0 considera o uso massivo de sistemas de rede inteligentes e IoT. Dessa forma, o foco da Indústria 4.0 é criar produtos, procedimentos e processos inteligentes. Assim, fábricas inteligentes constituem a

	característica principal dessa estrutura.” (p.1502)
Ramirez-Mendoza, 2018	“O conceito de I4.0 baseia-se na integração de tecnologias de informação e comunicação com a tecnologia industrial, e depende principalmente da construção de um sistema cibernético para realizar uma fábrica digital e inteligente, para promover a fabricação mais digital, orientada por informações, personalizada e verde. O objetivo da I4.0 é construir um modelo de produção altamente flexível de produtos e serviços personalizados e digitais, com interações em tempo real entre pessoas, produtos e dispositivos durante o processo de produção.” (p.1274)
Jerman et al., 2018	“O termo Indústria 4.0 pode ser usado como sinônimo da Quarta Revolução Industrial. Baseia-se em conceitos e tecnologias que incluem Sistemas Físico-cibernéticos (CPS), Internet das Coisas (IoT), Internet dos Serviços (IoS) e computação cognitiva - plataformas tecnológicas que empregam Inteligência Artificial. O setor 4.0 está criando a necessidade de transformar modelos de negócios tradicionais em modelos de negócios digitais, bem como a necessidade de conectar várias tecnologias e robôs, o que permite a personalização em massa na fabricação. Em geral, a Indústria 4.0 é apresentada como a aplicação de sistemas físico-cibernéticos nos sistemas de produção industrial. A Indústria 4.0 tem uma enorme influência na fabricação devido ao seu foco na criação de um ambiente inteligente.” (p.1)
Moeuf et al., 2018	“Em todos os casos, o conceito Indústria 4.0 é baseado no surgimento de novas tecnologias, como computação em Nuvem, Internet das Coisas, sistemas físico-cibernéticos e big data. Tais tecnologias devem melhorar a transmissão de informações em todo o sistema, o que permite um melhor controle e operações que sejam adaptados em tempo real, de acordo com a demanda variável.” (p.1119)

O conceito trazido pelo termo “Indústria 4.0”, amplamente utilizado em países de língua germânica (Lasi et al. 2014), tem se difundido também por meio de outros termos, como “Internet industrial”, “Manufatura avançada”, “Indústria integrada”, “Indústria inteligente”, “Produção inteligente”, etc. (Hermann et al., 2016).

Diversos países idealizaram também, concomitantemente ou posteriormente ao surgimento do termo Indústria 4.0 na Alemanha, de maneira centralizada ou não, iniciativas para desenvolver suas indústrias, como o “*Advanced Manufacturing Partnership*” e o “*Manufacturing USA*”, nos Estados Unidos (AMNPO, 2019); “*Made in China 2025*”, na China (Barría, 2018); “*La Nouvelle France Industrielle*” na França (Bellaiche, 2015); “*Future of Manufacturing*” no Reino unido (Foresight, 2013); “*Transizione 4.0*”, na Itália (Mise, 2019); “*Revitalization/Robotics Strategy*”, no Japão (Headquarters for Japan's Economic Revitalization. 2015); “*Innovation in Manufacturing 3.0*”, na Coreia do Sul (Suk-yee, 2015), “Agenda brasileira para Indústria 4.0” e “Indústria 2027”, no Brasil (MDIC, 2019; CNI, 2020), e até a União

Europeia (EFFRA, 2019) com o “*Factories of the Future*” (Baldassarre, Ricciardi & Campo, 2017; Dalenogare, Benitez, Ayala & Frank, 2018; Lee et al., 2018; Liao et al., 2017). Essas iniciativas demonstram que, independentemente do termo utilizado, existe uma tendência mundial de digitalização da indústria, ou seja, uma Quarta Revolução Industrial em construção.

2.2. *Tecnologias habilitadoras para a Indústria 4.0*

A Boston Consulting Group (Rüßmann et al., 2015) lista nove principais tecnologias habilitadoras para a Indústria 4.0: 1) Robôs autônomos; 2) Simulações; 3) Integração de sistemas (vertical e horizontal); 4) Internet das Coisas; 5) Cibersegurança (*Cyber Security*); 6) Computação em Nuvem (*Cloud Computing*); 7) Big Data e Data Analytics; 8) Manufatura Aditiva e 9) Realidade Aumentada. Wang, Wan, Li, & Zhang (2016) afirmam que algumas tecnologias emergentes são habilitadoras para a Indústria 4.0, como Internet das Coisas, Computação em Nuvem, Big Data e Inteligência Artificial. Lu (2017) afirma que as principais tecnologias para a Indústria 4.0 são: Computação em Nuvem, Computação móvel, Internet das Coisas e Big Data. De acordo com Lee et al. (2018), especialistas indicam Manufatura Aditiva, Big Data, Internet das Coisas, Robótica e Inteligência Artificial como as cinco principais tecnologias da Indústria 4.0, sendo Robótica e Inteligência Artificial as que possuem maior valor. As tecnologias apontadas serão melhor exploradas a seguir.

2.2.1. Robôs Industriais Autônomos (AIR)

O uso de robôs para execução de tarefas complexas na produção não é um fenômeno novo (Rüßmann et al., 2015), tendo seu uso popularizado na 3ª Revolução industrial, ao longo dos últimos 50 a 60 anos. Na Indústria 4.0, o uso de serviços e máquinas inteligentes, capazes de coletar informações em tempo real e interagir entre si, se torna possível à partir do desenvolvimento de habilidades em computação, comunicação, controle, autonomia e sociabilidade, que resultam da combinação de diferentes produtos com uso de microprocessadores e Inteligência Artificial (Alcácer & Cruz-Machado, 2019; Zhong, Xu, Klotz, & Newman, 2017). É esperado que estes robôs se tornem mais baratos e apresentem maior variedade de funcionalidades que os robôs atuais (Alcácer & Cruz-Machado, 2019; Rüßmann et al., 2015).

Dados os recentes avanços tecnológicos, os robôs industriais com uso de Inteligência Artificial têm se tornado mais autônomos, flexíveis e cooperativos (Rüßmann et al., 2015). Esses robôs são capazes de tomar decisões e executar tarefas em ambientes mutáveis, independentes do operador. fabricação e montagem são exemplos de processos que podem ser realizados pelos robôs autônomos. Aplicações industriais em ambientes perigosos e pouco estruturados podem ser executados por um ou mais Robôs Industriais Autônomos em colaboração (Alcácer & Cruz-Machado, 2019).

Existem ainda os robôs colaborativos, conhecidos como *Cobots*, que segundo Alcácer e Cruz-Machado (2019): "(...) são uma categoria de robôs especialmente projetados para interagir direta e fisicamente com seres humanos, em estreita cooperação" (p.912). Sensores de ponta, unidades de controle e visão computacional permitem a interação segura entre robôs e seres humanos e o trabalho lado a lado (Rüßmann et al., 2015). Essa interação permite a quebra da barreira humano-robô, possibilitando mais flexibilidade e opções de aplicações (Alcácer & Cruz-Machado, 2019). Nesse contexto, humanos e robôs industriais desenvolvem habilidades complementares de trabalho e surge a possibilidade de modelos de aprendizado de máquina (*human-in-the-loop*) por meio de interação com o ser humano (Zhong et al., 2017).

2.2.2. Inteligência Artificial (AI)

Ainda que não exista uma definição consensual de Inteligência Artificial, Mialhe e Hodes (2017) afirmam que o termo é geralmente atribuído a "(...) 'agentes' (programas executados em sistemas de computador) capazes de aprender, adaptar e implantar-se com sucesso em ambientes dinâmicos e incertos" (p.3). Ou seja, se assemelha à capacidade de aprendizado em um contexto dinâmico, de maneira autônoma e adaptativa.

Ainda segundo Mialhe e Hodes (2017), apesar do conceito ser antigo, apenas recentemente a Inteligência Artificial conseguiu um avanço significativo, em razão de três tendências: Big Data, aprendizado de máquina e Computação em Nuvem. A miniaturização eletrônica, os avanços em termos de processamento, os protocolos de comunicação e a virtualização de máquinas resultaram em uma alta capacidade de processamento em Nuvem que, por sua vez, permitiu o processamento do grande

volume de dados disponíveis (Big Data). Como resultado, temos os avanços em termos de aprendizado de máquinas, “(...) no qual algoritmos são capazes de classificar automaticamente padrões complexos a partir de conjuntos de dados muito grandes, via aprendizado supervisionado ou não supervisionado” (Mialhe & Hodes, 2017, p.3-4).

Na Indústria 4.0, a Inteligência Artificial e a Internet das Coisas são agregadas a objetos, tornando-os “objetos inteligentes”. A combinação de sensores, análise de dados e Inteligência Artificial permite a otimização da produção em tempo real. Os avanços em comunicação sem fio, redes de sensores, e outras tecnologias têm tornado possível que cada vez mais objetos inteligentes tenham acesso à rede de Internet das Coisas (Xu, Xu & Li, 2018). As tecnologias com Inteligência Artificial embarcada permitem que sistemas de manufatura inteligentes aprendam a partir dos dados, resultando em sistemas conectados, inteligentes e onipresentes (Monostori, 2014; Zhong et al., 2017). Os métodos de aprendizado de máquina e Inteligência Artificial desempenham um papel significativo na formulação de Sistemas Inteligentes de Manufatura (IMS, do inglês *Intelligent Manufacturing Systems*), que possibilitam a resolução de problemas sem precedentes e imprevisíveis (Monostori, 2014).

2.2.3. Simulações

Simulação é o método que utiliza modelos reais ou imaginados com o objetivo de prover estimativas e melhor compreender o funcionamento de sistemas ou processos. Por meio da modelagem de simulação, portanto, é possível analisar o comportamento de um sistema ou processo, simulando seus comportamentos e resultados em diferentes cenários, facilitando a tomada de decisão. Dessa forma, a simulação permite obter entendimento acerca de sistemas complexos, viabilizando testes de novos conceitos, sistemas, políticas de recursos, operações etc. antes da implementação, sem interromper o sistema vigente (Alcácer & Cruz-Machado, 2019).

Na fase de engenharia, modelos de simulação de produtos (3D), materiais e processos já se encontram estabelecidos, porém, na Indústria 4.0, dada a complexidade do ambiente de fabricação, a customização dos produtos, e as incertezas inerentes ao processo, as simulações ganharão ainda maior valor. Os sistemas serão capazes de coletar informações em tempo real de maneira a espelhar o sistema físico, incluindo pessoas, máquinas e produtos, permitindo testes de

configuração e otimização, reduzindo o tempo de setup, custos, ciclos de desenvolvimento e aumentando a qualidade do produto (Alcácer & Cruz-Machado, 2019; Rüßmann et al., 2015).

2.2.4. Integração de sistemas

Os diversos sistemas de informação presentes nas empresas atualmente atuam de forma independente entre si ou parcialmente integrados. Tanto do ponto de vista inter-empresa (fornecedores e consumidores) como intra-empresa (departamentos como serviços, engenharia etc.), raramente os sistemas utilizados são completamente integrados entre si. No contexto da Indústria 4.0, é esperado que os sistemas sejam interligados de maneira coesa, intra e inter-empresa, permitindo o surgimento de cadeias de valor automatizadas que compartilhem dados em tempo real (Alcácer & Cruz-Machado, 2019; Rüßmann et al., 2015). A integração de sistemas é uma das principais características da Indústria 4.0 e não pode ser resumida à uma tecnologia. Kagermann et al. (2013) citam três diferentes tipos de integração: integração horizontal, integração vertical e integração de engenharia de ponta a ponta, sendo esta última também uma consequência das duas anteriores.

A vertente horizontal diz respeito à integração de vários sistemas de Tecnologia da Informação (TI) atuantes nas diferentes etapas de manufatura, desde o pedido até a produção, marketing e logística. Essa integração envolve troca de informações, materiais e energia dentro ou entre empresas, formando um ecossistema que abrange toda a cadeia de valor (Alcácer & Cruz-Machado, 2019; Kagermann et al., 2013). A vertente vertical diz respeito à integração entre subsistemas físicos e de informações internos a uma mesma empresa, em todos os seus níveis hierárquicos (Kagermann et al., 2013). Desta maneira, sensores, sistemas de controle, de gestão da produção, e de planejamento, se conectam ao sistema de Planejamento de Recursos Empresariais (ERP), permitindo maior flexibilidade e capacidade de reconfiguração da produção (Wang et al., 2016).

Integração de engenharia de ponta a ponta consiste em um processo de fabricação centrado no produto, no qual a cadeia de valor é interligada do começo ao fim de seu ciclo de vida, abrangendo desde a necessidade do consumidor, o design e desenvolvimento do produto, ao planejamento da produção, serviços, manutenção até a reciclagem. Esta integração permite customização do produto e até mesmo a

previsão do impacto do design do produto na produção e nos serviços (Alcácer & Cruz-Machado, 2019; Kagermann et al., 2013; Wang et al., 2016). Ainda de acordo com Kagermann et al. (2013):

Os sistemas de produção físico-cibernéticos compreendem máquinas inteligentes, sistemas de armazenamento e instalações de produção que foram desenvolvidas digitalmente e apresentam integração ponta a ponta baseada em TICs, da logística de entrada à produção, marketing, logística de saída e serviço. (p.14).

A Figura 3 ilustra os três tipos de integração: integração horizontal, integração vertical e integração de engenharia de ponta a ponta.

Fonte: Adaptado de Wang et al. (2016)

2.2.5. Internet das Coisas

A Internet das Coisas pode ser definida como a rede que permite que objetos individualmente identificados e pessoas se conectem e troquem informações entre si, de qualquer local, em qualquer momento, geralmente por meio de uma rede ou serviço (Alcácer & Cruz-Machado, 2019). A criação do protocolo de Internet IPv6 em 2012, forneceu endereços suficientes para permitir que objetos inteligentes (que fazem uso de sensores, atuadores e outros componentes digitais) utilizem uma rede direta

universal por meio da Internet para troca de informações (Kagermann et al., 2013). Segundo Alcácer e Cruz-Machado (2019), a arquitetura da Internet das Coisas é comumente dividida em quatro camadas:

1. Camada de sensoriamento: coleta o status do objeto de identidade única por meio da integração e uso de RFID, sensores, atuadores etc.;
2. Camada de rede: realiza a transferência de informação entre as camadas de sensoriamento e de serviço;
3. Camada de serviço: apoia o uso de serviços e aplicações demandas por usuários ou outras aplicações;
4. Camada de interface: realiza a interconexão e gestão dos objetos, disponibiliza informações por meio de interações claras e compreensíveis.

As aplicações da Internet das Coisas se estendem desde cidades inteligentes e manufatura até a assistência médica (Zhong et al., 2017). As informações digitalizadas e disponibilizadas na IoT por meio dos sensores podem ser utilizadas de maneira a reconfigurar os padrões de produção de acordo com a necessidade, a partir do uso de cópias virtuais (*Digital Twins*) do mundo físico. Na Indústria 4.0, com a aplicação da IoT, entre outras tecnologias, os sistemas de produção (recursos e máquinas) podem ser virtualizados e gerenciados. (Alcácer & Cruz-Machado, 2019).

2.2.6. Cibersegurança

A digitalização dos processos produtivos carrega consigo tanto os benefícios quanto os riscos do mundo digital. Na Indústria 4.0, as fronteiras das empresas não são claras e a segurança dos dados é crítica para o sucesso das empresas e da indústria. O compartilhamento de informações valiosas, como dados de clientes, de produção, produtos etc. nas redes intra e inter-empresa colocam as empresas em risco e demanda o desenvolvimento de protocolos de segurança específicos. A Cibersegurança pode ser entendida então como a promoção de um alto nível de segurança da informação, aplicado também a ambientes industriais e na Internet das Coisas, de maneira a proteger, detectar e responder à ataques (Alcácer & Cruz-Machado, 2019).

“A IoT deve ser construída com base nas comunicações de segurança em cada ponto do processo de fabricação e a interoperabilidade de segurança deve ser garantida entre as instalações como elementos básicos da cadeia de suprimentos.” (Alcácer & Cruz-Machado, 2019; p.912). A Cibersegurança pode ser garantida por meio de duas maneiras complementares: arquiteturas de segurança e segurança por meio do design. Os controles de segurança devem existir em diferentes níveis: do dispositivo, da rede e da planta de fabricação (Alcácer & Cruz-Machado, 2019).

2.2.7. Computação em Nuvem (*Cloud Computing*)

“A Computação em Nuvem refere-se tanto aos aplicativos entregues como serviços pela Internet quando ao *software* e hardware dos *datacenters* que fornecem esses serviços” (Armbrust et al., 2010, p.50). Essa tecnologia permite: a redução dos custos diretos e indiretos de uma estrutura de TI; economias de escala dada a amplitude do serviço; economias em termos de utilização apenas da capacidade computacional necessária; e ainda permite a portabilidade pela possibilidade de uso em celulares e tablets, por exemplo (Alcácer & Cruz-Machado, 2019). De acordo com Xu et al. (2018), a Computação em Nuvem apresenta potencial para viabilizar alto desempenho a um baixo custo.

A Computação em Nuvem fornece diferentes serviços (Figura 4): (i) Infraestrutura como serviço (IaaS) - fornecimento de recursos computacionais fundamentais como servidores, infraestrutura digital, redes e armazenamento no qual o usuário pode utilizar os *softwares* que desejar; (ii) Plataforma como serviço (PaaS) - usuário pode desenvolver e utilizar suas próprias aplicações na plataforma; (iii) *Software* como serviço (SaaS) - fornecimento de *softwares* que rodam em Nuvem e podem ser acessados por diferentes dispositivos (Alcácer & Cruz-Machado, 2019). O uso da Computação em Nuvem na manufatura permite a modularização e orientação para serviço, utilizando a rede de recursos de maneira distribuída. A manufatura como serviço tem demonstrado grande potencial (Xu et al., 2018).

Figura 4: Serviços fornecidos pela Computação em Nuvem

Fonte: Alcácer e Cruz-Machado (2019)

2.2.8. Big Data Analytics

As crescentes aplicações digitais que surgem com a Internet, bem como os avanços da Internet das Coisas permitem uma coleta de informações sem precedentes. Os objetos e pessoas conectados geram um imenso volume de dados estruturados, semiestruturados e não estruturados, o que é chamado de Big Data. Esses dados possuem grande valor estratégico e econômico, porém, para a extração de valor, se faz necessário transformá-los em informações úteis para a tomada de decisão por meio do processamento e análise dos dados, conhecido como Big Data Analytics (Alcácer & Cruz-Machado, 2019; Zhong et al., 2017). “(...) Para organizações e fabricantes com uma abundância de dados operacionais e de chão de fábrica, técnicas avançadas de análise são críticas para descobrir padrões ocultos, correlações desconhecidas, tendências de mercado, preferências de clientes e outras informações comerciais úteis” (Zhong et al., 2017; p.622).

Na Indústria 4.0, além dos dados coletados da própria produção, utilizados para otimização da mesma e aumento de produtividade e competitividade, informações sobre o cliente, uso do produto em todo seu ciclo de vida, etc. podem ser utilizados

para melhorar os produtos, o atendimento ao cliente e auxiliar a tomada de decisões e solução de problemas. Por outro lado, a quantidade, complexidade e estrutura dos dados coletados podem tornar muito caro a armazenagem e análise dos mesmos, sendo importante utilizá-los de maneira a extrair o maior valor agregado pelo menor custo (Alcácer & Cruz-Machado, 2019; Zhong et al., 2017). “Perguntas sobre quais dados devem ser coletados, como esses dados podem ser coletados, como formular, qual é o significado e como analisar devem ser respondidas” (Wang et al., 2016; p.8).

2.2.9. Manufatura Aditiva

A criação de objetos 3D por meio de um sistema controlado por computador e por uso do processo de deposição de materiais em camadas é conhecido como Manufatura Aditiva. Esse processo possui relevância na Indústria 4.0 devido à sua capacidade de substituir processos produtivos convencionais e permitir o desenvolvimento de novos produtos, negócios e até mesmo novas cadeias de valor (Alcácer & Cruz-Machado, 2019). A Manufatura Aditiva permite a prototipagem rápida, acelerando, facilitando e possivelmente reduzindo o tempo de desenvolvimento de produtos. Produção de componentes individuais e pequenos lotes personalizados de produtos podem ser comercializados de maneira lucrativa (Alcácer & Cruz-Machado, 2019; Rüßmann et al., 2015). “Sistemas de Manufatura Aditiva descentralizados e de alto desempenho reduzirão as distâncias de transporte e o estoque disponível” (Rüßmann et al., 2015, p.5).

De acordo com Alcácer e Cruz-Machado (2019), alguns dos benefícios potenciais do uso da Manufatura Aditiva incluem: (i) Maior nível de customização com menor custo e necessidade de ferramental extra; (ii) Manufatura de geometrias complexas que não poderiam ser produzidas pelos processos tradicionais; (iii) Manufatura de estruturas de treliças e peças ocas; (iv) Utilização de material de maneira mais eficiente ou até mesmo sem desperdício; (v) Simplificação da produção de grandes variedades de peças; (vi) Manufatura sob demanda de maneira escalável. Os autores citam ainda a possibilidade de produção de peças em escala nano, micro, macro e larga escala.

2.2.10. Realidade Aumentada

Realidade Aumentada é uma tecnologia que sobrepõe ou combina objetos virtuais à uma realidade processada digitalmente por meio de um gadget com câmera, seja ele um celular, tablet, ou até mesmo um óculos especial. Ou seja, a realidade aumentada combina objetos reais e virtuais em um ambiente real (Alcácer & Cruz-Machado, 2019). Segundo Carmigniani et al. (2011), “A Realidade Aumentada visa simplificar a vida do usuário, trazendo informações virtuais não apenas para o ambiente imediato, mas também para qualquer visão indireta do ambiente do mundo real (...)” (p.342).

No contexto industrial, a realidade aumentada tem se mostrado útil para a solução de diferentes problemas. Sua capacidade de reproduzir e reutilizar informações digitais permite aplicações não apenas na manufatura, mas também no desenvolvimento de produtos. Atividades de montagem e manutenção fazem uso da realidade aumentada para a disponibilização imediata de informações relevantes em tempo real, economizando recursos, tempo do operador, melhorando seu desempenho na execução da tarefa e na tomada de decisão. Aplicações em armazenamento e *picking*, treinamento, controle de qualidade, painéis de desenvolvimento, monitoramento, entre outras já estão sendo desenvolvidas para aplicação industrial (Alcácer & Cruz-Machado, 2019; Rüßmann et al., 2015).

2.3. Impactos da Indústria 4.0 em termos de produto

De maneira a compreender melhor e ainda expandir os conceitos e tecnologias anteriormente apresentados e, considerando ainda que os tópicos anteriores apresentaram maior detalhamento dos impactos da Indústria 4.0 em termos de produção, se faz necessário aprofundar um pouco mais em alguns dos impactos em termos de produto. Um termo frequente na literatura de Indústria 4.0 é o produto inteligente (*smart product*). De acordo com Porter e Heppelmann (2015) os produtos conectados apresentam três elementos principais:

- “(...) componentes físicos (como peças mecânicas e elétricas);
- componentes inteligentes (sensores, microprocessadores, armazenamento de dados, controles, software, sistema operacional incorporado e interface digital do usuário); e

- componentes de conectividade (portas, antenas, protocolos e redes que permitem a comunicação entre o produto e a Nuvem do produto, que é executada em servidores remotos e contém o sistema operacional externo do produto). (p.4)

Ainda segundo os autores, produtos conectados suportam a troca de dados entre o produto, o usuário, o fabricante, outros produtos, e ainda outras possíveis fontes externas. Os produtos inteligentes trazem novas capacidades além das capacidades dos produtos conectados: monitoramento de suas próprias condições e de condições ambientais; controle remoto do usuário sobre operações complexas executadas pelo produto; da combinação do controle remoto e monitoramento de dados, são potencializadas oportunidades de otimização de performance do produto (com uso de algoritmos, por exemplo); por fim, a combinação das três características anteriores permite a autonomia do produto, que é capaz de “aprender, adaptar-se ao ambiente e às preferências do usuário, prestar serviços de manutenção e operar por conta própria” (Porter & Heppelmann, 2015, p.5)

De acordo com Feliciano Filho, Liao, Loures e Junior (2017), as principais aplicações do conceito de produtos inteligentes na literatura são: gestão das informações do produto, abordando aspectos como a interoperabilidade e padrões, bem como informações embarcadas no produto; fabricação orientada ao produto, abordando aspectos como a cooperação entre recursos (ex; máquinas inteligentes), otimização e eficiência da produção e produtos inteligentes customizados; e Aquisição de dados do ciclo de vida do produto, abordando aspectos como fases de desenvolvimento, transporte e uso do produto.

Os produtos inteligentes favorecem a tendência de servitização, ou seja, dos sistemas produto-serviço (PSS): “PSS significa que as empresas mudaram o conceito de gerenciamento de 'produto principal e serviço em segundo' para 'produto baseado em serviço' (...) e os produtos são as ferramentas produzidas e inovadas para o serviço” (Kuo & Wang, 2012, p.6691) O objetivo, portanto, é oferecer ao cliente a performance e o uso do produto, mais do que produto em si, do que a transferência da propriedade do objeto físico (Marilungo, Papetti, Germani,& Peruzzini, 2017). Na Indústria 4.0, o PSS evolui para o conceito de *Smart PSS* (sistema produto-serviço inteligente), que se utiliza dos sistemas físico-cibernéticos para oferecer serviços

digitais como pacotes, com inovações geradas por meio do uso de plataformas direcionadas pelos dados (Zheng, Lin, Chen, & Xu, 2018).

Nesse contexto, o conceito de *Digital Twin* (gêmeo digital do produto) ajuda a pavimentar o caminho para a integração com sistemas físico-cibernéticos, funcionando como uma réplica virtual do objeto físico "(...) que compreende suas características, propriedades, condições e comportamentos selecionados por meio de modelos, informações e dados em uma única ou mesmo em várias fases do ciclo de vida" (Stark & Damerau, 2019, p.1). O *Digital Twin* (DT) é composto por três componentes: o produto físico, a réplica virtual do produto, e os dados que conectam ambos (Qi & Tao, 2018). De acordo com Durão, Haag, Anderl, Schützer e Zancul (2018), com base em sua revisão sistemática de literatura, para ser considerado um DT, quatro aspectos devem estar presentes: "escalabilidade (capacidade de analisar diferentes escalas de informação); interoperabilidade (capacidade de converter, combinar e estabelecer equivalência entre modelos de representação); expansibilidade (capacidade de integrar modelos); e fidelidade (capacidade de estar em conformidade com o modelo físico)" (p.209). Em sua aplicação, o conceito de *Digital Twin* é utilizado principalmente em modelos de representação do produto e em simulações, porém, existe ainda a oportunidade de integração com o produto ao longo de seu uso para coleta de feedback que possa ser utilizado para a melhoria do produto, do seu processo produtivo, e até mesmo para oferta de serviços ao usuário.

Outra tendência favorecida pela Indústria 4.0 é a customização em massa, uma estratégia de micro segmentação de produto, na qual diferentes variantes de produtos e serviços podem ser relativamente alteradas ou até mesmo combinadas, mantendo a flexibilidade de componentes do produto, de maneira a atender as demandas do cliente por personalização do produto, porém, mantendo economias de escala (Pallant, Sands & Karpen, 2020). De acordo com Wang, Ma, Yang e Wang (2017) os sistemas de manufatura responsivos, a manufatura aditiva, e a característica pervasiva da computação e da internet possibilitam o avanço de um novo paradigma de produção, o de produção personalizada em massa (em inglês, *mass personalization production* – MPP). A produção personalizada em massa permite oferecer produtos customizados ao cliente, garantindo diferenciação em menor tempo, com maior qualidade, porém a custos similares aos da customização em massa. Outro aspecto relevante da MPP é a integração do consumidor no processo produtivo, sendo um fator essencial para a experiência do usuário.

(...) a essência da customização em massa é configurar diversas variantes de produtos por meio de modularidade com elementos comuns incorporados nas plataformas de produtos para reutilizar o design comprovado entre as famílias de produtos. Por outro lado, no paradigma da personalização em massa, é necessário que o atendimento ao produto seja mutável, adaptável e configurável, porque não apenas o produto final, mas também o design básico e a estrutura do produto devem ser capazes de se diferenciar no nível do módulo e do parâmetro para atender às necessidades únicas do indivíduo. (p.313)

2.4. *Fábricas de Aprendizagem*

Este tópico detalha o surgimento e evolução das Fábrica de Aprendizagem, sua definição e morfologia, bem como as características da literatura publicada no tema.

2.4.1. Visão geral da literatura sobre Fábricas de Aprendizagem

Em pesquisa na base dados Web of Science, para este trabalho e para artigos desenvolvidos no tema, foi possível obter uma visão geral da literatura sobre Fábricas de Aprendizagem. Conforme será detalhado em seguida e também no próximo tópico, de maneira geral, é possível perceber uma consistência no uso dos termos relativos à Fábricas de aprendizagem e ainda uma concentração da maioria das publicações em poucos congressos e revistas. Este nível de homogeneização é consequência de um esforço consciente de um grupo de pesquisa no tema que buscou consolidar a literatura e padronizar os termos utilizados, de maneira a gerar uma base de entendimento comum e, com isso, poder seguir para aplicações do conceito no lugar de discussões acerca de terminologia. O próximo tópico detalha como isso ocorreu, e para mais referências, é possível consultar Abele et al. (2019) e a linha do tempo fornecida pela IALF (2019a).

A maior parte da literatura presente atualmente na base de dados é proveniente da Conferência sobre Fábricas de Aprendizagem (*Conference on Learning Factories*). De um total de 273 artigos localizados na base Web os Scienc, utilizando os termos de pesquisa "*Learning Factory*" ou "*Learning Factories*", 238 são provenientes de congressos e apenas 34 são artigos e revisões (Figura 5).

Figura 5: Distribuição de documentos sobre Fábricas de Aprendizagem por país

Fonte: Web of Science

Antes do ano de 2012, menos que 4 artigos por ano eram publicados utilizando o termo “*Learning Factory*”. A partir de então é possível perceber a tendência de crescimento, em especial a partir de 2014 com o surgimento do grupo de pesquisa no tema. A Figura 6 exibe as publicações por ano até 2019.

Figura 6: Trabalhos que abordam o tema de Fábrica de Aprendizagem por ano

Fonte: Web of Science

Dos 34 artigos e revisões, alguns poucos trabalhos utilizam o termo “*Learning Factory*” com um significado diferente daquele empregado no presente trabalho. Esses trabalhos utilizam o termo pra descrever fábricas que tem um forte viés de aprendizagem e capacitação de seus funcionários, sendo uma “abordagem para a

solução de problemas dentro de uma fábrica real, que desenvolve procedimentos experimentais e os testa com o apoio de pesquisadores, gerentes e funcionários” (Leal, Fleury & Zancul, 2020a, p.2). Com relação à terminologia, Abele et al. (2019) corroboram o uso do termo “*Learning Factory*” (ou ainda “*Knowledge Factory*” e/ou “*Learning Laboratory*”) com o significado de “descrever uma fábrica que consegue integrar conhecimento interno e externo, resolução de problemas, experimentação e inovação na rotina diária de trabalho” (p.85). Já os demais artigos na amostra de 34, tratam de projetos didáticos e/ou aplicações de tecnologia em contextos de Fábricas de Aprendizagem, em linha com o significado mais comum do termo.

Relativo aos 238 trabalhos provenientes de congressos, a grande maioria é proveniente da *Conference on Learning Factories*. As principais fontes desses trabalhos, com pelo menos 5 trabalhos publicados e que concentram 71% do total, são todos provenientes de diferentes edições do *Conference on Learning Factories*, conforme é possível observar na Figura 7. Os trabalhos apresentados na *Conference on Learning Factories* são curtos, com limite de 6 páginas. Como consequência, os artigos apresentam um caráter mais prático, de descrição de desenvolvimentos de tecnologia e aplicações didáticas em Fábricas de Aprendizagem, ou ainda de formulação de Fábricas de Aprendizagem, seus aspectos didáticos, de produto, processo, etc., porém de maneira breve.

Figura 7: Principais fontes de trabalhos sobre Fábricas de Aprendizagem de Congressos

Fonte: Web of Science

É possível encontrar ainda artigos que utilizam o termo “*Teaching factory*” que traz também uma abordagem de aproximação entre ensino e indústria, porém “no conceito de *Teaching factory*, o ambiente de produção industrial é transmitido para a sala de aula usando fluxos de vídeo e modernas tecnologias de informação e comunicação” (Abele et al., 2019, p.86). Existem ainda sutis diferenças entre os usos do termo *Learning Factory*, mesmo quando abordam iniciativas práticas de ensino e aproximação com a indústria. Alguns ambientes de ensino, mesmo em artigos provenientes do *Conference on Learning Factories*, descrevem um ambiente que se assemelha mais à um *makerspace*, com equipamentos e ferramentas de design e engenharia para prototipagem e desenvolvimento de produto, como em Schützer, Rodrigues, Bertazzi, Durão, & Zancul (2017) e Lamancusa et al. (2008). É possível encontrar aplicações de tecnologia, chamados de *testbeds*, porém, geralmente se trata de demonstrações de tecnologia provenientes de empresas fornecedoras ou projetos de pesquisa pontuais, mas que não trazem uma visão ampla de reprodução de projeto fabril nem um projeto pedagógico atribuído.

Conforme será apresentado em detalhes no próximo tópico, o conceito de Fábrica de Aprendizagem utilizado neste trabalho abrange um ambiente que busca replicar um processo fabril, e não apenas fornecer ferramental para desenvolvimento de produto. Essa escolha é consequência do alinhamento com a tendência tanto da literatura como da prática, mas também - e principalmente -, do foco em Indústria 4.0 e sua centralidade na Alemanha, cujas Fábricas de Aprendizagem abraçam o conceito com esse significado.

2.4.2. Surgimento e evolução das Fábricas de Aprendizagem

A evolução do conceito das Fábricas de Aprendizagem pode ser entendida em três ondas consecutivas de desenvolvimento (Abele et al., 2019). Inicialmente, as Fábricas de Aprendizagem surgiram em universidades norte-americanas, por meio de um consórcio financiado pela *National Science Foundation* (NSF), entre as universidades *Penn State University*, *University of Puerto Rico-Mayagüez (UPRM)* e *University of Washington (UW)*, além do laboratório de financiamento federal *Sandia National Laboratories* e mais 24 parceiros comerciais. O consórcio emergiu em resposta à demanda de mudanças nas metodologias de ensino em Engenharia, em busca de maior equilíbrio entre teoria e prática. Essas demandas emergem do desejo

dos alunos por experiências práticas para aplicação dos conhecimentos adquiridos; da necessidade do setor industrial por engenheiros que consigam solucionar problemas reais, para além da teoria e simulações; e de avanços nas técnicas pedagógicas em ensino em engenharia, entre outros (Lamancusa et al., 2008).

Ainda de acordo com o Lamancusa (2008), em 1994, com o surgimento do consórcio, surge então o termo “Fábrica de Aprendizagem” (*Learning Factory*), fundamentada em três crenças: “(...) apenas palestras não são suficientes; os alunos se beneficiam de experiências interativas práticas; o aprendizado experimental em equipe, envolvendo participação de alunos, professores e indústria, enriquece o processo educacional e oferece benefícios tangíveis a todos.” (Lamancusa et al., 2008, p. 7).

Tendo em consideração a visão dos envolvidos no consórcio, bem como boas práticas de ensino, foram incorporados ao currículo de engenharia das universidades participantes atividades de design, manufatura, e realidade de negócios por meio de (Jorgensen, Lamancusa, Zayas-Castro & Ratner, 1995; Lamancusa et al., 2008; Abele et al., 2019):

- Desenvolvimento de uma instalação com ferramentas de usinagem e prototipagem rápida, fabricação eletrônica, etc., de acordo com a real capacidade de cada uma das três universidades envolvidas (*Penn State University, University of Puerto Rico-Mayagüez e University of Washington*);
- Direcionamento do currículo de engenharia para uma base prática, oferecendo cursos que desenvolvem, além da teoria e prática, habilidades de trabalho em equipe, comunicação e estímulo ao empreendedorismo;
- Aproximação e parceria com a indústria por meio de projetos demandados e patrocinados por empresas e de profissionais atuantes como palestrantes convidados nas disciplinas.

As primeiras Fábricas de Aprendizagem, que surgem como consequência do consórcio entre as três faculdades, promovem projetos de design em engenharia com foco prático, multidisciplinar e de trabalho em grupo, para a solução de problemas reais em parceria com a indústria. Pouco tempo depois, ainda nos EUA, surgem iniciativas semelhantes à Fábricas de Aprendizagem, tendo como inspiração os hospitais-escola, que permitem aos alunos aplicar seus aprendizados e obter treinamento profissional em um hospital real, em casos reais (Abele et al., 2019).

Cerca de 10 anos após o surgimento do conceito da Fábrica de Aprendizagem, começam a surgir diferentes iniciativas em diversas localidades, principalmente em universidades europeias, buscando promover experiências práticas aos alunos e aplicar conceitos de logística, produção, montagem etc., como o *Lean manufacturing*, por exemplo, em ambientes próximos da realidade de uma fábrica. Nessa segunda fase, o conceito se expande da oferta de ferramentas de design, manufatura e prototipagem, para a criação de um ambiente que imita uma fábrica real, replicando seu processo produtivo e/ou de montagem (Abele et al., 2015; Tisch, Ranz, Abele, Metternich & Hummel., 2015; Abele et al., 2019).

Em sua terceira onda, como consequência da expansão do conceito, foi realizada em 2011 a primeira Conferência sobre Fábricas de Aprendizagem (*1st Conference on Learning Factories*), em Darmstadt (Alemanha). A Conferência tem sido realizada anualmente em diferentes localidades desde então (IALF, 2019a). Nessa primeira conferência, foi fundada a *Initiative on European Learning Factories* (IELF), com o objetivo de aperfeiçoar e expandir mundialmente o conceito, além da promoção de projetos de pesquisa conjuntos. Em parceria com a Academia Internacional de Engenharia de Produção (CIRP), no ano de 2014, foi designado um Grupo de Trabalho Colaborativo (CWG - *Collaborative Working Group*), que ficou conhecido como “*CIRP CWG on Learning factories for future-oriented research and education in manufacturing*” (Grupo de trabalho colaborativo da CIRP sobre Fábricas de Aprendizagem para pesquisa e educação orientados para o futuro em manufatura, em tradução livre), ou ainda, de maneira reduzida, “*CIRP CWG on Learning factories*” (Abele et al., 2017; Abele et al., 2019; IALF, 2019b). Desde 2015, o CIRP apoia e patrocina a conferência anual de Fábricas de Aprendizagem: a *Conference on Learning Factories* (IALF, 2019a).

O objetivo do grupo de pesquisa *CIRP CWG on Learning factories* era definir um comum entendimento em relação aos termos usados no campo de conhecimento; agregar o conhecimento até então gerado; organizar pesquisas sobre Fábricas de Aprendizagem; além de estreitar a relação entre indústria e academia (Abele et al., 2019; IALF, 2019b). Os resultados foram publicados em forma de artigo, em 2017, no *CIRP Annals*, promovendo a definição do conceito de *Learning Factory*, suas características, exemplos de boas práticas, entre outros (Abele et al., 2017).

Ainda em 2015, a *Initiative on European Learning Factories* (IELF) passou a se chamar *International Association of Learning Factories* (IALF), abrindo a possibilidade

de participação para Fábricas de Aprendizagem de outras partes do mundo. Desde então, o interesse no tema tem crescido, o que fica claro em termos de participação no Congresso, publicações e surgimento de novas Fábricas de Aprendizagem. Recentemente, em 2019, três dos autores mais ativos em termos de publicação no tema lançaram o livro *Learning Factories: Concepts, Guidelines, Best-Practice Examples*, buscando concentrar grande parte do conhecimento e experiência acumulados em relação às Fábricas de Aprendizagem (Abele et al., 2019).

2.4.3. Definição e objetivo de Fábricas de Aprendizagem

Jorgensen et al. (1995, p.3) pouco tempo após o surgimento do termo Fábrica de Aprendizagem, definem o conceito como: “uma instalação projetada para servir como base para atividades usada em todo o currículo”. Essa definição tem como foco o uso do espaço por estudantes como apoio ao ensino. Após sua popularização, as definições foram expandidas de maneira a incorporar também a necessidade de um ambiente que funcione como “réplica” de uma instalação fabril, próxima de um processo produtivo real. Em 2013, uma definição ampla foi elaborada pelos membros da *Initiative on European Learning Factories*:

A Fábrica de Aprendizagem é um ambiente de aprendizado, onde processos e tecnologias são baseados em uma instalação industrial real que permite uma abordagem direta ao processo de criação de produtos. As Fábricas de Aprendizagem têm como base em um conceito didático que enfatiza a aprendizagem experimental e baseada em problemas. A filosofia de melhoria contínua é facilitada por ações próprias e envolvimento interativo dos participantes. (Abele et al., 2019, p. 87).

Alguns anos mais tarde, o grupo de trabalho *CIRP CWG on Learning factories*, em discussão com a comunidade internacional de Fábricas de aprendizagem, cunhou uma nova definição para o termo, publicada na *CIRP Encyclopedia*:

Uma Fábrica de Aprendizagem, em um sentido restrito, é um ambiente de aprendizado especificado por **processos** autênticos, que inclui várias estações de trabalho e compreende aspectos técnicos e organizacionais, uma **configuração** que pode ser alterada e se assemelha a uma cadeia de valor real, um **produto** físico sendo fabricado e um **conceito didático** que compreende a aprendizagem formal, informal e não

formal, possibilitada pelas próprias ações dos estudantes em uma abordagem de aprendizagem no local. Dependendo do **objetivo** da Fábrica de Aprendizagem, o aprendizado ocorre por meio de ensino, treinamento e/ou pesquisa. Consequentemente, os resultados da aprendizagem podem ser o desenvolvimento de competências e/ou inovação. É desejável um **modelo operacional** que garanta a operação sustentável da Fábrica de Aprendizagem. Em um sentido mais amplo, os ambientes de aprendizado que atendem à definição acima, mas com uma configuração que se assemelha a uma cadeia de valor virtual em vez de física, ou a um serviço em vez de um produto físico, ou a um conceito didático baseado em aprendizado remoto em vez de aprendizado no local também podem ser considerados como fábricas de aprendizado.” (Abele et al., 2016, p.1027)

Na proposição anteriormente apresentada, as Fábricas de Aprendizagem (LF – *Learning Factory*) foram divididas em duas categorias: Fábrica de Aprendizagem no sentido mais amplo, que inclui o uso de fábricas ou cadeias de valor virtuais simuladas por computador e/ou um serviço como produto principal; enquanto apenas Fábrica de Aprendizagem que possuem equipamentos e produtos físicos são consideradas Fábricas de Aprendizagem no sentido mais restrito. A Figura 8 detalha essa estruturação.

Conforme Abele et al. (2019), alguns pontos precisam ser destacados nesta definição. Os processos de produção devem ser realistas, não se limitando a máquinas e estações de trabalho únicas, ou um processo puramente técnico, dado que os aspectos operacionais também devem ser considerados. Em termos de aprendizado e treinamento, este pode incluir não apenas o aluno, mas também funcionários da indústria. Pesquisa e inovação, e a transferência desses para a indústria por meio da Fábrica de Aprendizagem, também são considerados processos de aprendizado. A definição destaca ainda a necessidade de um conceito didático que determine qual o aprendizado esperado, seu objetivo, quem ensina, quem aprende, de que maneira, onde e como o aprendizado ocorre. É desejável que o ambiente seja flexível e adaptável, de maneira a permitir espaços de aprendizagem baseada em experimentação para melhor acolher as ideias dos alunos e aprendizes.

Figura 8: Características e Classificação possíveis para uma Fábrica de Aprendizagem

Fonte: Abele et al. (2017)

2.4.4. Estrutura e morfologia de Fábricas de Aprendizagem

O grupo de pesquisa *CIRP CWG on Learning factories* (Tisch et al., 2015; Abele et al., 2017; Abele et al., 2019), tendo em consideração as pesquisas realizadas até o momento, bem como a experiência de seus associados, formulou uma proposta de morfologia para as Fábricas de Aprendizagem, que inclui dimensões relacionadas aos seguintes aspectos: Objetivo; Processo; Configuração (estrutura física ou virtual); Produto; Didática; Modelo operacional; e Métricas.

A Figura 9 ilustra a definição proposta. Em seguida, cada dimensão foi detalhada com base nos diferentes tipos de Fábricas de Aprendizagem identificadas pelo grupo. É importante ressaltar que, apesar de serem dimensões distintas, cada uma tem influência nas decisões das outras dimensões e precisam estar alinhadas e em harmonia para o funcionamento da Fábrica.

Figura 9: Morfologia de Fábricas de Aprendizagem

Fonte: Abele et al. (2017)

Muitas Fábricas de Aprendizagem estão localizadas em Universidades e Instituições acadêmicas, porém, existem também companhias e empresas de consultoria que se utilizam do modelo para capacitação de funcionários. Uma Fábrica de Aprendizagem não depende apenas de sua estrutura, mas também do seu modelo operacional, que garanta a sustentabilidade da mesma no longo prazo. Portanto, se faz necessário não apenas um modelo inicial de financiamento, mas também um modelo contínuo de geração de receita para manter o funcionamento, bem como a atualização da Fábrica de acordo com as necessidades que emergirem. Aspectos de recursos humanos, custos com matéria-prima, suprimentos, energia, etc. devem ser levados em consideração, assim como a manutenção do valor gerado pela Fábrica de Aprendizagem, se mantendo atualizada perante as necessidades do mercado. Esse modelo sustentável de geração de receita é o Modelo operacional da Fábrica de Aprendizagem. A Figura 10 detalha as diferentes escolhas possíveis para o Modelo operacional de uma Fábrica de Aprendizagem mapeados pelo *CIRP CWG on Learning factories* (Tisch et al., 2015; Abele et al., 2019).

Figura 10: Dimensão Modelo Operacional da Morfologia de uma Fábrica de Aprendizagem

1.1	Operador	Instituições acadêmicas			Instituições não acadêmicas					Organização com fins lucrativos	
		Universidade	Faculdade	BA	Ensino médio/ vocacional	Câmara	Sindicato	Associação de funcionários	Rede industrial	Consultoria	Companhia produtora
1.2	Instrutor	Professor		Pesquisador		Estudante assistente		Especialista técnico		Consultor	Educador
1.3	Desenvolvimento	Desenvolvimento próprio			Desenvolvimento com apoio externo				Desenvolvimento externo		
1.4	Financiamento inicial	Recursos internos			Recursos públicos				Recursos privados		
1.5	Financiamento em operação	Recursos internos			Recursos públicos				Recursos privados		
1.6	Continuidade do financiamento	Financiamento de curto prazo (ex: eventos únicos)			Financiamento de médio prazo (ex: projetos e programas <3 anos)				Financiamento de longo prazo (ex: projetos e programas > 3 anos)		
1.7	Modelo de negócio para treinamentos	Modelo aberto			Modelo fechado						
		Modelo de Clube		Taxas por cursos	(Programa de treinamento apenas para companhias únicas)						

Fonte: Tisch et al., 2015; Abele et al., 2019

O aprendizado é parte inerente ao conceito da Fábrica de Aprendizagem, sendo seu principal objetivo. O aprendizado, porém, pode ser realizado por meio de cursos para a graduação, da pesquisa acadêmica, de treinamento para a indústria, etc. Existem ainda objetivos secundários, como a demonstração de tecnologias e sua transferência para a indústria; a promoção de um ambiente de experimentação de modelos de produção a serem reproduzidos no contexto industrial; o desenvolvimento de produtos, entre outros. Recentemente, as Fábricas de Aprendizagem têm ganhado importâncias na demonstração de tecnologias da Indústria 4.0 e suas aplicações, transferindo conhecimento tanto para a indústria, quanto para o público acadêmico.

Os objetivos primários e secundários definem a dimensão Objetivo de uma Fábrica de Aprendizagem. A Figura 11 detalha as diferentes escolhas possíveis para a dimensão Objetivos primários e secundários de uma Fábrica de Aprendizagem mapeados pelo *CIRP CWG on Learning factories*, bem como os possíveis públicos, setores da indústria, tópicos de pesquisa etc. (Tisch et al., 2015; Abele et al., 2019).

Figura 11: Dimensão Objetivo de uma Fábrica de Aprendizagem

2.1	Objetivo principal	Educação			Treinamento vocacional				Pesquisa							
2.2	Objetivo secundário	Ambiente de teste/ Piloto			Produção industrial		Tranferência de inovação			Imagem pública						
2.3	Público-alvo para educação e treinamento	Crianças/ Escolas	Estudantes			Empregados						Trabalhador independente	Desempregados	Público aberto		
			Graduação	Mestrado	Doutorado	Aprendizes	Qualificados	Semi-qualificados	Não qualificados	Gestores						
										Nível baixo	Nível médio				Nível alto	
2.4	Perfil do grupo	Homogêneo		Heterogêneo (nível de conhecimento, hierarquia, estudantes + funcionários, etc.)												
2.5	Indústrias-alvo	Mecânica		Automotiva		Logística		Tranporte		Bens de consumo rápido		Aeroespaco				
		Química		Eletrônicos		Construção		Bancos e seguradoras		Têxtil		...				
2.6	Conteúdo de ensino	Processo de criação de produto		Eficiência energética e de recursos		Produção global		Engenharia industrial		Indústria 4.0		Gestão Lean		Design	...	
2.7	Papel da LF em pesquisa	Objeto de pesquisa						Facilitador de pesquisa								
2.8	Tópicos de pesquisa	Processo de criação de produto		Eficiência energética e de recursos		Produção global		Engenharia industrial		Indústria 4.0		Gestão Lean		Design	Didática	...

Fonte: Tisch et al., 2015; Abele et al., 2019

Dada a necessidade da Fábrica de Aprendizagem de funcionar como “réplica” de um processo produtivo, sendo o mais próximo possível do contexto real, se faz necessário definir o processo produtivo a ser representado na Fábrica. Tipo de processo, modelo organizacional, tecnologias, ciclo de vida do produto, fluxo de materiais, nível de automação, métodos de manufatura etc. são exemplos de decisões a serem tomadas em termos da dimensão do Processo. A Figura 12 detalha as diferentes escolhas possíveis para a dimensão Processo de uma Fábrica de Aprendizagem mapeados pelo *CIRP CWG on Learning factories* (Tisch et al., 2015; Abele et al., 2019).

Figura 12: Dimensão Processo de uma Fábrica de Aprendizagem

3.1	Ciclo de vida do produto	Planejamento do produto	Desenvolvimento do produto		Prototipagem	Manufatura	Montagem	Logística	Serviço	Reciclagem
3.2	Ciclo de vida da fábrica	Planejamento do investimento	Conceito da fábrica	Planejamento do processo	Aceleração				Manutenção	Reciclagem
3.3	Ciclo de vida do pedido	Configuração & pedido	Sequenciamento das ordens	Planejamento e programação					Seleção e embalagem	Envio
3.4	Ciclo de vida da tecnologia	Planejamento	Desenvolvimento	Teste virtual					Manutenção	Modernização
3.5	Funções indiretas	Atividades primárias				Atividades secundárias				
		Logística de entrada & saída	Marketing & vendas	Serviços	Infraestrutura	Recursos humanos	Desenvolvimento de tecnologia	Compras		
3.6	Fluxo de materiais	Produção contínua					Produção discreta			
3.7	Tipo de processo	Produção em massa		Produção serial	Produção em pequenas séries			Produção pontual		
3.8	Organização da manufatura	Local fixo		Bancadas		Oficina		Fluxo		
3.9	Nível de automação	Manual			Parcialmente automatizado/ híbrido			Completamente automatizado		
3.10	Método de manufatura	Corte	Modelagem primária	Conformação	Combinação	Revestimento	Mudança propriedades do material			
3.11	Tecnologia de manufatura	Físico			Químico			Biológico		

Fonte: Tisch et al., 2015; Abele et al., 2019

Apesar da tradicional configuração física de representação do processo produtivo da Fábricas de Aprendizagem, é possível que se faça uso de uma estrutura virtual, ou até mesmo que se combine ambas abordagens. Opções relativas ao tamanho da fábrica, se apresenta uma configuração miniaturizada ou em tamanho real de um ambiente fabril, a quantidade de estações de trabalho, etc. são também possibilidades de configuração, assim como seu nível de flexibilidade (capacidade de remodelar a adaptar a Fábrica de acordo com as necessidades), e a presença de sistemas de informação como ERP - Enterprise Resource Planning (sistema de planejamento de recursos da empresa, MES - Manufacturing Execution Systems (sistema de gerenciamento das atividades de produção), CRM - Customer Relationship Management (sistema de gerenciamento de relacionamento com o cliente) e PLM - Product Lifecycle Management (gerenciamento de ciclo de vida de produto) e modelagens em CAD - Computer Aided Design (desenho assistido por computador), CAM - Computer Aided Manufacturing (fabricação assistida por computador) etc. A Figura 13 detalha as diferentes escolhas possíveis para a dimensão Configuração de uma Fábrica de Aprendizagem mapeados pelo *CIRP CWG on Learning factories* (Tisch et al., 2015; Abele et al., 2019).

Figura 13: Dimensão Configuração de uma Fábrica de Aprendizagem

4.1	Ambiente de ensino	Puramente físico	Fábrica física suportada por fábrica digital	Cadeia de valor física estendida virtualmente	Puramente virtual		
4.2	Escala do ambiente	Reduzido			Tamanho real		
4.3	Sistema de trabalho	Estação	Célula	Sistema	Segmento	Fábrica	Rede
4.4	Facilitadores para flexibilidade	Mobilidade	Modularidade	Compatibilidade	Escalabilidade	Universalidade	
4.5	Dimensões de flexibilidade	Produto	Processo	Organização		Prédio & Layout	
4.6	Integração de TI	TI antes do procedimento operacional padrão (CAD, CAM, simulação)		TI depois do procedimento operacional padrão (PPS, ERP, MES)		TI depois da produção (CRM, PLM)	

Fonte: Tisch et al., 2015; Abele et al., 2019

O produto funciona como um instrumento de ensino e suporte à transferência de conhecimento - assim como o processo e a configuração da Fábrica - e pode ser desenvolvido especificamente para uso na fábrica ou selecionado a partir de um produto já existente no mercado. A quantidade de produtos, suas variantes e componentes são também decisões que influenciam a dimensão Produto. A Figura 14 detalha as diferentes escolhas possíveis para a dimensão Produto de uma Fábrica de Aprendizagem mapeados pelo *CIRP CWG on Learning factories* (Tisch et al., 2015; Abele et al., 2019).

Figura 14: Dimensão Produto de uma Fábrica de Aprendizagem

5.1	Materialidade	Material (produto)			Imaterial (serviço)		
5.2	Forma do produto	Carga geral		Produtos a granel		Fluxo de produtos	
5.3	Origem do produto	Desenvolvimento próprio		Desenvolvimento pelos participantes		Desenvolvimento externo	
5.4	Comercialização do produto	Disponível no mercado		Disponível no mercado, porém simplificado didaticamente		Não disponível no mercado	
5.5	Funcionalidade do produto	Produto funcional		Adaptado didaticamente com função limitada		Sem função/aplicação, apenas para demonstração	
5.6	Nº de diferentes produtos	1 Produto	2 Produtos	3-4 Produtos	>4 Produtos	Flexível, desenvolvido por participantes	Aceita pedidos reais
5.7	Nº de variantes	1 Variante	2-4 Variantes	5-20 Variantes	...	Flexível, desenvolvido por participantes	Determinado por pedidos reais
5.8	Nº de componentes	1 Componente	2-5 Componentes	6-20 Componentes	21-50 Componentes	51-100 Componentes	>100 Componentes
5.9	Utilização continuada do produto	Reuso/ reciclagem		Exibição	Doação	Venda	Descarte

Fonte: Tisch et al., 2015; Abele et al., 2019

Wagner, AlGeddawy, ElMaraghy e Müller (2014) fornecem indicações de como escolher o produto para uma Fábrica de Aprendizagem flexível, além da comparação destes com um produto convencional em termos de processo, objetivo, uso, parâmetros, características, etc. A Tabela 3 detalha melhor essa comparação.

Tabela 3: Comparação entre um produto convencional e um produto para Fábrica de Aprendizagem

	Produto convencional	Produto para Fábrica de Aprendizagem adaptativa
Ambiente de produção	Influenciado pelo produto	Influencia o produto
Processo de produção	Influenciado pelos requerimentos do produto	Pré-determinado
Parâmetros do produto	Determinado pelos requerimentos funcionais	Determinado pelas capacidades e limitações do sistema de produção
Objetivos	Preencher requerimentos e necessidade do mercado e do consumidor	Ajuste e apoio às capacidades do ambiente de aprendizado
	Vender e obter lucro	Oferecer maior suporte possível para o conteúdo educacional e de pesquisa
Características do produto	Produto real	Modelo simplificado de um produto real
	Cumprir determinadas funções	Oferecer maior suporte possível para a Fábrica de Aprendizagem e seus objetivos
Após o uso	Reusado, reciclado, descartado	Reusado em muitos ciclos de processo

Fonte: Wagner et al., 2014

Considerando o objetivo geral das Fábricas de Aprendizagem de promover o aprendizado, os aspectos didáticos de ensino precisam ser definidos. Metodologia, cenários de uso e ensino, ambientação, nível de autonomia do aprendiz, papel do instrutor e do aluno, fundamentação teórica, avaliação etc. são importantes elementos que precisam ser selecionados. A Figura 15 detalha as diferentes escolhas possíveis para a dimensão Didática de Ensino mapeados pelo *CIRP CWG on Learning factories* (Tisch et al., 2015; Abele et al., 2019)

Figura 15: Dimensão Didática de uma Fábrica de Aprendizagem

6.1	Classes de competências	Técnica e metodológica		Comunicação & social	Pessoais	Orientado à implementação e atividades	
6.2	Dimensões de aprendizado	Cognitiva		Afetiva		Psicomotora	
6.3	Estratégia de cenários de aprendizado	Instrução	Demonstração	Cenário fechado		Cenário aberto	
6.4	Tipo de ambiente de ensino	Greenfield (desenvolvimento do ambiente da fábrica)			Bownfield (melhoria do ambiente de fábrica existente)		
6.5	Canal de comunicação	Aprendizado no local (no ambiente da fábrica)			Conexção remota (com o ambiente de aprendizado)		
6.6	Nível de autonomia	Instruído	Autoguiado / Autoregulado		Autodeterminado / Auto-organizado		
6.7	Papel do treinador	Apresentador	Moderador	Coach		Instrutor	
6.8	Tipo de treinamento	Tutorial	Curso prático de laboratório		Seminário	Oficina	Projeto
6.9	Padronização dos treinamentos	Padronizado			Customizado		
6.10	Fundamentação teórica	Pré-requisito	Anterior	Alternado com partes práticas		Baseado na demanda	Após
6.11	Níveis de avaliação	Feedback dos participantes	Aprendizado dos participantes	Transferência para uma fábrica real	Impacto econômico do treinamento	Retorno do treinamento (ROI)	
6.12	Avaliação do sucesso de aprendizado	Teste de conhecimentos (escrito)	Teste de conhecimentos (oral)	Relatório escrito	Apresentação oral	Exame prático	Nenhum

Fonte: Tisch et al., 2015; Abele et al., 2019

O tamanho da Fábrica de Aprendizagem em termos de espaço físico disponível, capacidade de treinamentos, nível de utilização etc. descreve a dimensão Métricas da Fábrica, a qual tem utilidade em termos de planejamento e gerenciamento do uso. A Figura 16 detalha as diferentes escolhas possíveis para a dimensão Métricas de uma Fábrica de Aprendizagem mapeados pelo *CIRP CWG on Learning factories* (Tisch et al., 2015; Abele et al., 2019).

Figura 16: Dimensão Métricas de uma Fábrica de Aprendizagem

7.1	Nº participantes por treinamento	1-5 participantes	6-10 participantes	11-15 participantes	16-30 participantes	>30 participantes	
7.2	Nº treinamentos padronizados	1 treinamento	2-4 treinamentos	5-10 treinamentos		>10 treinamentos	
7.3	Duração média de um treinamento	1 dia	>1 a ≤2 dias	>2 a ≤5 dias	>5 a ≤10 dias	>10 a ≤20 dias	> 20 dias
7.4	Participantes por ano	< 50 participantes	50-200 participantes	201-500 participantes	501-1000 participantes	>1000 participantes	
7.5	Utilização da capacidade	< 10%	>10% a ≤20%	>20% a ≤50%	>50% a ≤75%	> 75%	
7.6	Tamanho da LF	> 100 m ²	>100m ² a ≤300m ²	>300m ² a ≤500m ²	>500m ² a ≤1000m ²	> 1000m ²	
7.7	Equivalente (FTE) a tempo completo na LF		< 1	2-4	5-9	10-15	> 15

Fonte: Tisch et al., 2015; Abele et al., 2019

Tisch, Hertle, Abele, Metternich & Tenberg (2016) apresentam uma abordagem sistemática para projeto de Fábricas de Aprendizagem e para a definição e desenvolvimento da abordagem didático-tecnológica, em três níveis conceituais: 'Fábrica de Aprendizagem' (macro); 'módulo de ensino' (meso); e 'situação de aprendizagem' (micro). No nível macro, são definidos os objetivos de ensino, bem como a infraestrutura tecnológica e didática. No nível meso, são formulados os módulos de ensino, tendo como base os objetivos e a infraestrutura definidos no nível macro. No nível micro, são especificadas as situações de ensino dentro de cada módulo definido no nível meso. De maneira transversal, duas transformações didáticas são propostas, respondendo às perguntas: 1ª. Quais são os objetivos e conteúdos relevantes para as partes interessadas? e 2ª. Como esses objetivos de aprendizagem e o conteúdo podem ser abordados na Fábrica de Aprendizagem? A Figura 17 abaixo detalha a proposta.

Figura 17: Três níveis conceituais para um Fábrica de Aprendizagem

Fonte: Tisch et al., 2016

Com o advento da Indústria 4.0, surge a necessidade de transferência de tecnologia, bem como de capacitação de pessoal e formação de competências para a implementação das mudanças emergentes (Kagermann et al., 2013). Nesse contexto, as Fábricas de Aprendizagem emergem como solução para o

desenvolvimento e/ou demonstração de aplicações de tecnologias para a Indústria 4.0, permitindo a experimentação de soluções, aproximação com a indústria, além da formação e atualização de profissionais que se adaptem à complexidade crescente (Abele et al., 2019).

As Fábricas de Aprendizagem, ambientes de ensino altamente complexos, se configuram como ambientes capazes de criar a conexão entre a prática e a teoria no contexto da produção (Baena et al., 2017; Abele et al., 2019). Como consequência, recentemente, diversas Fábricas de Aprendizagem têm surgido ou migrado para o tema Indústria 4.0. (Baena et al., 2017; Elbestawi et al., 2018; Enke et al., 2018; Abele et al., 2019; Rauch et al., 2019) Na Alemanha, a maioria das Fábricas de Aprendizagem em Indústria 4.0 atende a Pequenas e Médias Empresas (PMEs), por meio de uma rede apoio para treinamento e disseminação dos conceitos do tema (Abele et al., 2019).

Em pesquisa no repositório *Web of Science* pelos termos ["*Learning Factory*" OR "*learning factories*"] AND ["*industry 4.0*" OR "*industrie 4.0*" OR "*industries 4.0*" OR "*fourth industrial revolution*"], apesar de trazer apenas 81 documentos, foi possível identificar o crescente interesse pelo uso de Fábricas de Aprendizagem para transmitir conhecimentos desde o ano de 2015 (Figura 18). Baena et al. (2017) apresenta alguns aspectos do desenvolvimento de uma Fábrica de aprendizagem em Indústria 4.0, como a definição do produto, da cadeia de valor, bem como dos cursos a serem oferecidos. Enke et al. (2018) propõem um currículo de ensino para o desenvolvimento de competências para a Indústria 4.0. Apesar de apresentar aspectos de ensino, em geral, as Fábricas de Aprendizagem em Indústria 4.0 atualmente se concentram mais em transferência de tecnologia e desenvolvimento de pesquisa, do que em treinamento e educação (Abele et al., 2019).

Figura 18: Trabalhos com tema de Fábrica de Aprendizagem em Indústria 4.0 por ano

Fonte: Web of Science

3. METODOLOGIA DE PESQUISA

O presente trabalho aplica a metodologia de Estudo de caso, que pode ser definida como uma estratégia de pesquisa aplicada com o objetivo de compreender as dinâmicas vigentes em configurações únicas (Eisenhardt, 1989). Voss, Tsikriktsis e Frohlich (2002) afirmam que muitas teorias e conceitos inovadores em gestão de operações foram concebidos com uso de pesquisa de campo. Segundo Yin (2015), a definição do Estudo de caso pode ser compreendida em duas partes:

1. Um Estudo de caso é uma investigação empírica que:
 - investiga um fenômeno contemporâneo (o "caso") em profundidade e dentro de seu contexto do mundo real, especialmente quando;
 - os limites entre fenômeno e contexto podem não ser claramente evidentes.
2. Uma investigação de Estudo de caso
 - lida com uma situação tecnicamente distinta em que haverá muito mais variáveis de interesse do que pontos de dados e, como resultado;
 - se baseia em várias fontes de evidência, com os dados precisando convergir de maneira triangular e, como outro resultado;
 - se beneficia do desenvolvimento prévio de proposições teóricas para orientar a coleta e análise de dados. (p.17-18)

Ou seja, o Estudo de caso se utiliza de uma análise empírica em profundidade de um fenômeno contemporâneo, no qual o contexto possui relevância para os resultados e conclusões, se utilizando de proposições teóricas para direcionamento da coleta de dados, a partir de diversas fontes de evidências trianguladas. Ainda segundo Yin (2015), a escolha do emprego do Estudo de caso como metodologia de pesquisa depende especialmente de três pontos: (i) Questão de pesquisa: questões do tipo “Como” e “Porque”, que buscam explicar um fenômeno presente, e/ou questões que requerem uma descrição detalhada de um fenômeno social, podem se beneficiar da metodologia; (ii) Controle: quando o pesquisador possui pouco ou nenhum controle sobre os fenômenos a serem estudados; (iii) Objeto de estudo: quando os fenômenos a serem estudados são contemporâneos.

De acordo com Voss et al. (2002), o método de Estudo de caso pode ser usado com diferente propósitos: (i) Exploração: descobrir possíveis áreas de pesquisa e desenvolvimento de teoria; (ii) Construção de teoria: identificação de variáveis principais, relacionamentos entre elas, além da justificativa para tais relacionamentos; (iii) Teste de teoria: verificar a aplicabilidade de teorias previamente desenvolvidas; (iv) Extensão/refinamento de teoria: refinar teorias previamente desenvolvidas à partir dos resultado empíricos observados. Segundo Eisenhardt (1989), o Estudo de caso pode ser utilizado tendo como objetivo construção de teoria, teste de teoria, ou ainda a descrição de um fenômeno.

Dado o objetivo de pesquisa de analisar a implementação de uma Fábrica de Aprendizagem com foco em Indústria 4.0, tendo em consideração a relevância do contexto para o fenômeno, e do estudo de um fenômeno contemporâneo, além da impossibilidade de controle acerca do fenômeno, é possível afirmar que a metodologia de Estudo de caso é adequada para o presente estudo, tendo como propósito a extensão/refinamento de teoria.

De acordo com Miguel et al. (2012), o Estudo de caso possui como benefícios a possibilidade de desenvolver novas teorias ou aprofundar a compreensão acerca de fenômenos contemporâneos e atuais, sendo comumente utilizado em pesquisas na Engenharia de Produção. Apesar disto, segundo o autor, a realização adequada de um Estudo de caso pode ser entendida como uma tarefa não trivial. Como consequência, o planejamento e execução do mesmo devem ser realizados com rigor, de maneira a gerar resultados e conclusões suportadas pelas evidências.

Yin (2015) reforça a necessidade de rigor e a importância do planejamento no Estudo de caso. O autor sugere um “processo linear, mas iterativo” para a execução do mesmo (Figura 19). O presente trabalho usará o modelo proposto por Yin (2015) como guia para o planejamento do Estudo de caso. A primeira etapa, o Plano de pesquisa, se trata da identificação das questões de pesquisa e escolha do método, que já foram anteriormente apresentados e justificados neste trabalho. A etapa seguinte, portanto, é a de Projeto de Estudo de caso.

Figura 19: Etapas da pesquisa de Estudo de caso

Fonte: Yin (2015)

3.1. *Projeto do Estudo de caso*

Na etapa de Projeto do Estudo de caso, se faz necessário: definição da unidade de análise e escolha de casos possíveis para o estudo; desenvolvimento da teoria relacionada ao tema de pesquisa; definição do tipo de Estudo de caso (único, múltiplo, holístico e integrado); definição dos procedimentos para manter a qualidade no Estudo de caso (Yin, 2015). Tendo como objetivo analisar a implementação de uma Fábrica de Aprendizagem com foco em Indústria 4.0, dadas as questões de pesquisa: “Como a implementação de uma Fábrica de Aprendizagem para demonstração de tecnologias, ensino e pesquisa de Indústria 4.0, pode ser organizada em fases de evolução, em termos de configuração física, recursos financeiros e humanos, operação, e aplicações no ensino?”, “Quais as aplicações possíveis da Fábrica de Aprendizagem por fase de implementação?” e “Como a estrutura da Fábrica de Aprendizagem implementada segundo as fases adotadas se compara em relação à literatura vigente nas áreas de Fábrica de Aprendizagem e de Indústria 4.0?”, a unidade de análise escolhida foi a própria Fábrica de Aprendizagem. A teoria relacionada ao tema de pesquisa foi desenvolvida no Capítulo 2 - Revisão de literatura.

De acordo com Yin (2015), o Estudo de caso pode ser do tipo caso único ou casos múltiplos, ou ainda holístico, quando possui apenas uma unidade de análise, ou integrado, quando possui mais de uma unidade de análise (Figura 20). Para o presente estudo, foi definido um projeto de caso único holístico (apenas um nível de análise), destacado em verde na Figura 20. Ainda segundo Yin (2015) a escolha do Estudo de caso único tem cinco justificativas possíveis: Caso crítico: para teste de teoria já bem desenvolvida; Incomum: quando se trata de um caso extremo ou peculiar; Comum: quando se trata de um caso típico, ou representativo, por captar as circunstâncias padrão do fenômeno; Revelador: quando se torna possível investigar um fenômenos anteriormente inacessíveis, uma oportunidade única; ou longitudinal: quando é possível observar o fenômeno em dois ou mais pontos no tempo.

Figura 20: Tipos de Estudo de caso

Fonte: Yin (2015)

No presente trabalho, a escolha de caso único se justifica por se tratar de um fenômeno incomum, além da capacidade de fazer um acompanhamento longitudinal, e de obter maior profundidade no detalhamento do caso. “Um Estudo de caso

longitudinal investiga o presente, de certa forma superando as limitações do Estudo de caso retrospectivo.” (Miguel et al., 2012, p.135).

Em termos de garantia da qualidade do estudo, Yin (2015), sugere algumas táticas para garantida da validade dos construtos, validade interna, validade externa e confiabilidade (Tabela 4). Na etapa de Projeto do Estudo de caso, o autor recomenda, para casos únicos, que seja feito uso da teoria existente. A revisão da literatura anteriormente apresentada, portanto, favorece a garantia da validade externa do presente estudo.

Tabela 4: Táticas para garantida da validade dos construtos, validade interna, validade externa e confiabilidade no Estudo de caso

Testes	Tática para o Estudo de caso	Fase da pesquisa
Validade do construto	<ul style="list-style-type: none"> • Usar múltiplas fontes de evidência • Estabelecer cadeia de evidências • Informantes chave revisam o esboço do relatório do estudo 	Coleta de dados Coleta de dados Composição
Validade interna	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar combinação de padrões • Realizar construção da explicação • Abordar explicações rivais • Usar modelos lógicos 	Análise de dados Análise de dados Análise de dados Análise de dados
Validade externa	<ul style="list-style-type: none"> • Usar teoria em estudo de caso únicos • Usar a lógica de replicação em estudos de caso múltiplos 	Projeto da pesquisa Projeto da pesquisa
Confiabilidade	<ul style="list-style-type: none"> • Usar protocolo do estudo de caso • Desenvolver uma base de dados para o estudo 	Coleta de dados Coleta de dados

Fonte: Yin (2015)

3.2. *Preparação, Coleta de dados, Análise de evidências e Relatório do caso*

A Preparação para a coleta de dados abrange principalmente o desenvolvimento das habilidades do investigador, a definição do caso, a aprovação para a coleta de dados, bem como o desenvolvimento do protocolo do Estudo de caso. Dado o objetivo de analisar a implementação de uma Fábrica de Aprendizagem com foco em Indústria 4.0, foi escolhida a Fábrica do Futuro, uma Fábrica de Aprendizagem focada em Indústria 4.0 localizada no Centro de Inovação da USP (InovaUSP) e coordenada por professor da Escola Politécnica da USP. A Fábrica do Futuro conta

atualmente com uma série de demonstradores de tecnologias de Indústria 4.0, bem como um projeto pedagógico que envolve disciplinas de graduação de Engenharia e Design, pesquisas acadêmicas e projetos de extensão, e ainda uma rede de empresas parceiras e usuárias.

De acordo com Eisenhardt (1989), as evidências em estudos de caso são geralmente obtidas por métodos de coleta de dados como: arquivos, entrevistas, questionários e observações. As evidências podem ser ainda quantitativas ou qualitativas. Yin (2015) aponta seis fontes de evidências: documentação, registro em arquivos, entrevistas, observações diretas, observação participante, e artefatos físicos, listando os pontos fortes e fracos de cada um (Tabela 5).

Tabela 5: Fontes de evidência para Estudo de caso

Fonte de evidências	Pontos fortes	Pontos fracos
Documentação	<ul style="list-style-type: none"> • Estável – pode ser revisada repetidamente • Exata – pode conter nomes, referências e detalhes exatos de um evento • Ampla cobertura – pode cobrir longo espaço de tempo, muitos eventos e ambientes 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade de recuperação – pode ser baixo • Seletividade tendenciosa, se a coleta incompleta • Relato de visões tendenciosas – reflete viés do autor • Acesso – pode ser deliberadamente negado
Registros em arquivos	<ul style="list-style-type: none"> • [Os mesmos mencionados para documentação] • Preciso e quantitativo 	<ul style="list-style-type: none"> • [Os mesmos mencionados para documentação]
Entrevistas	<ul style="list-style-type: none"> • Direcionadas – enfocam diretamente no tópico do estudo de caso • Perceptivas – fornecem inferências causais percebidas 	<ul style="list-style-type: none"> • Viés quando as questões são mal construídas • Respostas tendenciosas • imprecisões devido a memória fraca • Reflexibilidade – o entrevistado dá ao entrevistado o que ele quer ouvir
Observação direta	<ul style="list-style-type: none"> • Realidade – trata de acontecimentos em tempo real • Contextual – trata do contexto do evento 	<ul style="list-style-type: none"> • Consome muito tempo e recurso • Seletividade – salvo ampla cobertura • Flexibilidade – acontecimentos podem ocorrer de forma diferente porque estão sendo observados

Observação participante	<ul style="list-style-type: none"> • [Os mesmos mencionados para observação direta] • Perceptiva em relação a comportamentos e razões interpessoais 	<ul style="list-style-type: none"> • [Os mesmos mencionados para observação direta] • Parcialidade devido à manipulação dos eventos por parte do pesquisador
Artefatos físicos	<ul style="list-style-type: none"> • Perceptivo em relação a aspectos culturais • Perceptivo em relação a operações técnicas 	<ul style="list-style-type: none"> • Seletividade • Disponibilidade

Fonte: Yin (2015)

No presente estudo, foram utilizados como fontes de evidências principalmente documentos, observação direta, observação participante e artefatos físicos, dada a facilidade de acesso aos mesmos e tendo em vista a colaboração do coordenador da Fábrica do Futuro. No total, foram analisados 7 trabalhos de formatura, 2 dissertações de mestrado, 2 artigos publicados, 4 propostas de pesquisa, 4 apresentações internas, centenas de fotos e inúmeros arquivos secundários como e-mails, reportagens, cronogramas de disciplinas, etc. A maior parte do conteúdo descritivo provém da análise desses documentos, dos artefatos físicos (visita ao local), e da observação direta e participante. De maneira complementar às demais fontes de evidência, cinco entrevistas informais direcionadas a tópicos específicos da história e/ou do funcionamento de demonstradores foram realizadas com o coordenador e com dois colaboradores de longo prazo da Fábrica, conforme surgiam lacunas na história ou divergências. Esses colaboradores revisaram ainda pontos específicos da história e da descrição dos demonstradores no quais os mesmos tiveram participação ao longo da implementação.

Visando aumentar a confiabilidade do estudo, bem como a validade dos constructos, foram utilizadas: múltiplas fontes de evidência; estabelecimento de uma cadeia de evidências; revisão dos rascunhos pelos principais informantes; além da manutenção de um banco de dados de evidências do Estudo de caso. A Tabela 6 apresenta um resumo das definições de pesquisa anteriormente apresentadas, bem como o protocolo para coleta e análise de dados.

Tabela 6: Visão geral do Estudo de caso e protocolo de pesquisa

Visão geral do Estudo de caso	
Objetivo da Pesquisa:	A analisar a implementação de uma Fábrica de Aprendizagem com foco em Indústria 4.0
Questões de pesquisa	<p>1. Como a implementação de uma Fábrica de Aprendizagem para demonstração de tecnologias, ensino e pesquisa de Indústria 4.0, pode ser organizada em fases de evolução, em termos de configuração física, recursos financeiros e humanos, operação, e aplicações no ensino?</p> <p>2. Quais as aplicações possíveis da Fábrica de Aprendizagem por fase de implementação?</p> <p>3. Como a estrutura da Fábrica de Aprendizagem implementada segundo as fases adotadas se compara em relação à literatura vigente nas áreas de Fábrica de Aprendizagem e de Indústria 4.0?</p>
Unidade de análise	Fábrica de Aprendizagem
Tipo de Estudo de caso	Caso único holístico (apenas um nível de análise)
Caso escolhido	Fábrica do Futuro (FF)
Fontes de evidências	Documentos, Observação direta e participante, Artefatos físicos, Entrevistas informais para complementar lacunas da história e dos desmontadores, bem como esclarecer divergências
Instrumentos para garantia da qualidade no estudo	
Validade interna	Diferentes fontes de evidência
Validade externa	Uso da literatura como base para formulação do instrumento de pesquisa e para análise
Validade do construto	Múltiplas fontes de evidência; Revisão dos rascunhos pelos principais informantes
Confiabilidade	Cadeia de evidências; Banco de dados do evidências do Estudo de caso.
Etapas de coleta e análise de dados executadas	
Etapas	Descrição
1. Coleta de evidências	Identificação e coleta de evidências: artigos, apresentações, propostas de projetos, convênios de parceria, imagens, e-mails, dissertações, trabalhos de graduação, visitas, etc. Criação do banco de dados de evidências.
2. Linha do tempo da implementação	Divisão em fases e descrição em texto e tabelas. Complementação com entrevistas informais com foco em tópicos específicos de divergência e lacunas. Revisão dos textos e tabelas pelos envolvidos.

3. Descrição dos demonstradores	Identificação e descrição em texto e imagens cada um dos demonstradores. Complementação com entrevistas informais com foco em tópicos específicos de aprofundamento dos demonstradores. Revisão pelos envolvidos.
4. Classificação da Fábrica do Futuro	Classificação da Fábrica do Futuro em relação à morfologia de Fábricas de Aprendizagem da literatura. Revisão junto ao coordenador.
5. Comparação com a literatura sobre tecnologias de Indústria 4.0	Listado, para cada demonstrador, as tecnologias de Indústria 4.0 aplicados em comparação com a literatura, identificando quais tecnologias foram abordadas e quais não foram cobertas, além de aspectos gerais de Indústria 4.0.
6. Relatório final do Estudo de caso	Preparação da dissertação.

4. RESULTADOS

Neste capítulo será discutida a estrutura em nível macro, conforme a classificação apresentada por Tisch et al. (2016) da Fábrica do Futuro, abordando: Seção 4.1 - Contexto de surgimento e visão geral; Seção 4.2 - Fases de implementação; Seção 4.3 - Configuração física e virtual, produto utilizado para demonstração, demonstradores de tecnologia e conceitos da Indústria 4.0; Seção 4.4- Aplicações didáticas realizadas por meio da Fábrica do Futuro; e Seção 4.5 – Classificação morfológica da Fábrica do Futuro.

4.1. *Contexto e visão geral*

A Fábrica do Futuro foi idealizada a partir da percepção da necessidade de aproximar os alunos, a comunidade docente e a indústria aos conceitos da Indústria 4.0, bem como aos seus potenciais e impactos previstos. A implementação da Fábrica do Futuro foi realizada de maneira gradual e se teve início com um teste de conceito em menor escala. Em sua idealização e implementação, diversos alunos de graduação, pós-graduação e professores do corpo docente contribuíram de maneira essencial ou esporádica, assim como algumas empresas parceiras. O processo de construção da Fábrica do Futuro é dividido em três fases, com base em evoluções significativas ocorridas na Fábrica de Aprendizagem. As fases de desenvolvimento e implementação serão abordadas no tópico seguinte.

Atualmente, a Fábrica do Futuro está localizada no edifício InovaUSP, uma instalação recém erguida na Universidade de São Paulo que tem como objetivo hospedar iniciativas de inovação. Segundo descrição do próprio site, o InovaUSP (2020): “É um espaço que visa agregar e integrar laboratórios e diversas iniciativas em um ambiente multidisciplinar dedicado ao desenvolvimento de pesquisa e inovação. Laboratórios de pesquisa independentes das unidades universitárias, atividades colaborativas interdisciplinares no espaço multiusuário”. A Fábrica do Futuro faz parte de uma subdivisão, chamada de PATEO, dos laboratórios que ocupam o prédio: “(...) o PATEO é um centro de pesquisa focado na digitalização. Nossa missão é integrar equipes de pesquisa multidisciplinares e parceiros universitários para pesquisar e desenvolver novas soluções digitais avançadas” (InovaUSP, 2020). Além da Fábrica do Futuro, fazem parte do PATEO iniciativas de

Jogos e Experiência do usuário, Inteligência Artificial & Aprendizado de máquina, e ainda Soluções digitais para Modelos de negócios emergentes e Empreendedorismo. A inserção da Fábrica do Futuro no prédio InovaUSP e no centro de pesquisa PATEO é estratégica e se alinha aos objetivos de inovação e colaboração com a comunidade e com a indústria. A Fábrica do Futuro fica localizada no piso térreo do prédio InovaUSP. Além do espaço do chão de fábrica, a Fábrica possui ainda mais quatro salas que servem como escritórios e salas de projeto. A Figura 21 apresenta as fachadas traseira e frontal do prédio InovaUSP. A Figura 22 apresenta a planta baixa do andar e sessão do prédio onde se localiza a Fábrica do Futuro.

Figura 21: Fachadas traseira e frontal do prédio InovaUSP

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2018

Figura 22: Planta baixa e localização da Fábrica do Futuro e escritórios

Fonte: Acervo PATEO InovaUSP, 2017

4.2. Etapas de implementação

O conceito da Fábrica do Futuro foi sendo aprimorado e adaptado em cada uma das fases de implementação, de maneira a melhor aproveitar os recursos e oportunidades disponíveis em cada momento, além das adaptações providas do próprio aprendizado ao longo da execução. As etapas de implementação foram divididas em 3 fases: Fase 1, de Concepção e Teste de conceito (2015 a 2017); Fase 2, de Implementação (2018 a 2019); e Fase 3 de Consolidação (2020 até o momento presente), que serão detalhadas em seguida:

4.2.1. Fase 1 – Concepção e Teste de conceito

De acordo com arquivos consultados, o conceito da Fábrica do Futuro emergiu à partir da inspiração de Fábricas de Aprendizagem presentes em universidades alemãs, como a Demofabrik² (RWTH Aachen), a CiP³ (TU Darmstadt), e a ETA-Fabrik⁴ (TU Darmstadt). Os idealizadores do projeto atuaram em cooperação com as universidades Technische Universität Darmstadt⁵ (TU Darmstadt) e Universidade Metodista de Piracicaba⁶ (UNIMEP), como parte de um projeto CAPES da modalidade Bragecrim⁷, e foram realizadas visitas às fábricas CiP e ETA nesse período.

A proposta inicial da Fábrica do Futuro foi elaborada por dois docentes do Departamento de Engenharia de Produção da Escola Politécnica (Poli) da USP, com apoio de um estudante de mestrado e alguns estudantes de graduação do mesmo departamento, além de quatro empresas e um instituto de pesquisa que forneceu apoio na fase de geração do conceito. A proposta previa um Laboratório didático com foco em abordagens ativas de ensino, e foi submetida para financiamento em edital da própria Universidade de São Paulo, obtendo resultado positivo. Segundo a proposta de financiamento, os fundamentos principais do projeto incluíram: “*O ensino empregando abordagens de didática ativa e visando a formação do aluno para o*

² Para mais informações, acessar: <https://demofabrik-aachen.rwth-campus.com/>

³ Para mais informações, acessar: <https://prozesslernfabrik.de/>

⁴ Para mais informações, acessar: <https://eta-fabrik.de/>

⁵ Para mais informações, acessar: <https://www.tu-darmstadt.de/>

⁶ Para mais informações, acessar: <http://unimep.edu.br/>

⁷ Para mais informações, acessar: <https://www.capes.gov.br/bolsas-e-auxilios-internacionais/pais/194-alemanha/9572-programa-bragecrim>

pensamento crítico; A oferta de ambientes de aprendizado que simulam as condições reais de uma fábrica; A preparação de profissionais para atuar com tecnologias modernas de produção, que irão impactar significativamente a competitividade e a vida da sociedade no Brasil e no mundo nos próximos anos”.

Nesta fase foi definido o produto a ser produzido na Fábrica do Futuro, bem como o processo de produção. O produto escolhido foi o skate, tendo em consideração, segundo a própria proposta de financiamento, os seguintes critérios: *“Relevância em problema complexo para a sociedade, no caso a mobilidade urbana; Variedade de materiais e de processos produtivos viáveis para produção em um laboratório didático, permitindo simular empresas reais; Simplicidade da estrutura do produto e de seus componentes, possibilitando a reutilização com baixo custo operacional, viabilizando o uso do ambiente e materiais em vários anos seguidos, sem requerer significativos recursos de orçamento para custeio; Possibilidade da incorporação de serviços agregados e modernos, típicos de produtos conectados na Internet; Possibilidade de produção altamente customizada, típica dos ambientes de Indústria 4.0”.*

O produto demonstrador (skate) possuía opções de customização desde essa fase inicial, incluindo diferentes tamanhos de *shapes* e, conseqüentemente, de *trucks*, além das cores das rodinhas. Inicialmente, foi idealizada também a produção de *shapes* e rodinhas, mas essa proposta não chegou a ser executada. A elaboração da primeira versão da Fábrica foi apoiada por diferentes alunos de graduação por meio de seus Trabalhos de Formatura (da Silva, 2015; Cheng, 2016; Guimarães, 2017), que abordaram aspectos como: definição dos demonstradores de tecnologia; arranjo do layout físico; definição de ferramentas e equipamentos necessários; mobiliário para estações de trabalho, estocagem, reposição de estoque; componentes do skate, etc. O desenvolvimento teve apoio ainda de um estudante de mestrado, tanto operacionalmente (compra de materiais, organização do espaço, etc.), quanto em sua dissertação, que teve como foco a customização em massa e manufatura aditiva (Durão, 2017). Nesse período, foram publicados cinco artigos de pesquisas derivadas da Fábrica do Futuro, com foco em Manufatura distribuída, Manufatura aditiva, Customização em massa e Internet das Coisas (Durão, Christ, Anderl, Schützer & Zancul, 2016; Zancul, Durão, Rocha, & Silva, 2016; Zancul et al., 2016; Durão, Carvalho & Zancul, 2017; Durão, Christ, Zancul, Anderl & Schützer, 2017).

Os demonstradores desenvolvidos nessa fase incluem: produto customizado com interface de configuração via aplicativo, montagem manual e identificação unitária de todos os componentes com QR Code para controle de qualidade e estoque; manufatura aditiva e manufatura distribuída, com a instalação de sensores em uma impressora 3D localizada na Universidade de São Paulo que permitiu o controle à distância (manufatura distribuída) realizado por parceiros de projeto na universidade TU Darmstadt e um mestrando em período sanduíche nessa mesma universidade; localização *indoors* de componentes, com uso de RFID instalado no próprio skate e beacons instalados no espaço físico, com apoio de uma empresa de soluções para Internet das Coisas que cedeu os equipamentos; controle de qualidade de componentes do skate com uso de visão computacional para medição de parâmetros-chave, com apoio de uma startup que cedeu equipamentos e instalação. Para maior detalhamento, consultar da Silva (2015), Cheng (2016) e Guimarães (2017).

A instalação foi realizada em uma pequena sala dentro do departamento de Engenharia de Produção da Poli e ficou aberta à visita pelos alunos. A Tabela 7 abaixo resume as características principais da primeira fase. As Figuras 23 a 28 apresentam a estrutura e resultados da primeira fase.

Tabela 7: Características da 1ª fase de implementação da Fábrica do Futuro

Implementação da Fábrica do Futuro - Fase 1: Concepção e Teste de conceito	
Objetivo	Teste de conceito do ambiente de aprendizagem e demonstração de tecnologias
Período	2015 a 2017
Recursos humanos	2 docentes Dep. Engenharia de Produção Poli USP 1 mestrando Dep. Engenharia de Produção Poli USP
Apoio de empresas	4 empresas
Financiamento	Universidade de São Paulo, R\$50.000
Demonstradores	1. Produto customizado e Identificação unitária de componentes com QR Code para controle de qualidade e estoque 2. Manufatura Aditiva e Manufatura Distribuída 3. Localização <i>indoors</i> com uso de RFID e <i>Beacons</i> 4. Visão computacional para controle de qualidade de componentes
Trabalhos acadêmicos	3 Trabalhos de Formatura 1 Dissertação de mestrado 5 Artigos publicados
Uso didático	Visitação de alunos

Figura 23: Processo de produção do skate

Fonte: Proposta Laboratório Didático Fábrica do Futuro POLI, 2016

Figura 24: Demonstradores de Localização *indoors* e QR Code

Fonte: Guimarães (2017)

Figura 25: Demonstrador de Produto customizado

Fonte: Guimarães (2017)

Figura 26: Demonstrador de Manufatura Aditiva e Manufatura Distribuída

Fonte: Guimarães (2017)

Figura 27: Demonstrador de Visão computacional para controle de qualidade

Fonte: Guimarães (2017)

Figura 28: Gravação de material para mídia na primeira versão da Fábrica do Futuro

Fonte: Guimarães (2017)

4.2.2. Fase 2 – Implementação

Os resultados obtidos na primeira fase tiveram como consequência o crescente interesse de parceiros e aceitação da comunidade acadêmica. Como consequência, surgiu a necessidade de ampliar a Fábrica do Futuro em termos de tecnologias, demonstradores, participantes, espaço físico, etc. Na Fase 2, essa expansão foi viabilizada por meio de recursos obtidos via editais. Em março de 2018, um edital de fomento para a criação de ambientes de testes e demonstrações de tecnologias de Indústria 4.0 foi lançado pelo então Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços e pela ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (MDIC, 2018). O projeto foi inscrito nesse edital, apresentando uma proposta atualizada de demonstradores de tecnologia e apoio de cinco docentes, sendo dois deles da Engenharia de Produção Poli USP, um da Engenharia Mecatrônica Poli USP, dois do Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos Poli USP, e um professor do curso de Mecatrônica do Instituto de Ensino e Pesquisa (Insper).

A partir da colaboração com o Insper, surgiu a oportunidade de expandir a Fábrica do Futuro para além da Universidade de São Paulo, possibilitando o desenvolvimento de um Demonstrador de Monitoramento de máquinas e Manufatura distribuída localizado em um laboratório do Insper. Um segundo *hub* da Fábrica do Futuro foi desenvolvido no laboratório Centro Interdisciplinar de Tecnologias Interativas (CITI) também da USP.

Figura 29: Hubs da Fábrica do Futuro

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

Em contato com a indústria, 18 empresas demonstraram interesse em participar do projeto e declararam apoio. Essas empresas foram divididas em dois tipos: as fornecedoras e as usuárias. As fornecedoras são empresas que produzem

tecnologias e serviços B2B, como sistemas de gestão e controle de qualidade por visão computacional. As usuárias são empresas B2C que produzem bens de consumo, por exemplo. As fornecedoras usam a Fábrica do Futuro para demonstrar aplicações de seus produtos e serviços. As empresas usuárias, por outro lado, podem utilizar a Fábrica do Futuro para realizar testes e provas de conceito de aplicações de Indústria 4.0. As empresas fornecedoras e usuárias foram convidadas, em 2019, a participar de uma reunião de apresentação dos resultados de implementação de demonstradores, e da geração de ideias para as próximas fases da Fábrica.

O projeto foi aprovado e contemplado no edital, e a maior parte dos recursos foi executada nos meses iniciais de 2019. Tendo em consideração que o projeto apresentado ao edital de fomento da ABDI previa apenas investimento em equipamentos, de maneira a viabilizar as atividades do dia a dia da Fábrica do Futuro, o projeto foi inscrito também no edital de fomento do Fundo Patrimonial Amigos da Poli, tendo sido contemplado, garantindo assim a cobertura de despesas complementares como materiais de consumo. Adicionalmente, algumas das empresas envolvidas tiveram maior participação na implementação, oferecendo a concessão de software e hardware do seu portfólio, bem como dedicando horas de trabalho para implementação e integração de sistemas e equipamentos.

Dada a necessidade de expansão física para abrigar os novos demonstradores, foi iniciada a busca por um espaço físico maior. Neste período, surgiu a oportunidade de integração da Fábrica do Futuro ao grupo de pesquisa PATEO, no prédio InovaUSP. Foi concedido então um espaço originalmente dedicado ao estacionamento de um dos prédios, no andar térreo, para a instalação da Fábrica do Futuro. Uma reforma e adequação do ambiente foi realizada e finalizada em 2018. No início de 2019, todos os equipamentos e mobiliário da Fábrica do Futuro foram transportados para o novo prédio e novos equipamentos foram adicionados a partir dos recursos provenientes do edital da ABDI. Uma das empresas parceiras, especializada em sensores e sistemas de comunicação e controle, forneceu ainda componentes (sensores principalmente) para uso na Fábrica do Futuro e por projetos correlacionados. Alguns equipamentos (computadores e uma impressora 3D) e bens de consumo (material para impressora 3D) provenientes de projetos de pesquisa relacionados também foram instalados na Fábrica do Futuro, dada a proximidade da temática dos projetos.

Nesse período, dois pesquisadores de mestrado prestaram apoio operacional na implementação da Fábrica do Futuro; quatro Trabalhos Finais de Graduação foram desenvolvidos no tema, desenvolvendo a otimização e balanceamento da linha de produção do skate (Hupfeld, 2018), a arquitetura de produto (Cassoli, 2019) o desenvolvimento do sistema embarcado para o skate (Morgado, 2019), e o detalhamento do sistema de visão computacional (Sen, 2019); uma dissertação de mestrado foi desenvolvida detalhando o projeto geral da Fábrica do Futuro (Grotti, 2019); além disso, em agosto 2019, três estudantes de graduação bolsistas foram alocados para prestar apoio na Fábrica do Futuro no desenvolvimento e aprimoramento dos demonstradores. Nesse período foram publicados quatro artigos proveniente de pesquisas derivadas da Fábrica do Futuro com foco em manufatura aditiva, Internet das Coisas, *Digital Twin* e na gestão da incerteza na implementação da manufatura avançada (Durão, Haag, Anderl, Schützer, & Zancul, 2018; Durão, Guimarães, Salerno & Zancul, 2019; Durão, Barkoczy, Zancul, Ho & Bonnard, 2019; Durão, Guimarães, Salerno & Zancul, 2019). Algumas outras empresas, alunos e professores contribuíram de maneira esporádica com a evolução da iniciativa.

Os demonstradores de tecnologia e conceitos da Indústria 4.0 foram reformulados e/ou expandidos na segunda fase. Nesse período, oito demonstradores foram implementados na nova localização e serão detalhados no tópico 4.3. Demonstradores de tecnologias e conceitos de Indústria 4.0. A Tabela 8 abaixo resume as características principais da segunda fase.

Tabela 8: Características da 2ª fase de implementação da Fábrica do Futuro

Implementação da Fábrica do Futuro - Fase 2: Implementação	
Objetivo/Foco	Implementação e expansão
Período	2018 a 2019
Recursos humanos	2 docentes Dep. Eng. de Produção Poli USP 1 docente Dep. Eng. Mecatrônica Poli USP 2 docentes Dep. Eng. de Sistemas Eletrônicos Poli USP 1 docente curso Mecatrônica Insper 2 mestrandos Dep. Engenharia de Produção Poli USP 1 doutorando Dep. Engenharia de Produção Poli USP 3 estudantes de graduação
Apoio de empresas	23 empresas

Financiamento	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), R\$295.966,30 Fundo Patrimonial Amigos da Poli, R\$ 20 mil em 2018 e R\$ 61 mil em 2019 Fornecimento de hardware, software e horas de trabalho por empresas parceiras
Demonstradores	D1 - Montagem customizada D2 - Controle de qualidade por visão computacional D3 - Produto conectado D4 - Manufatura aditiva e Monitoramento remoto D5 - <i>Digital Twin</i> D6 - Identificação de componentes D7 - Monitoramento de máquinas e Manufatura distribuída D8 - Separação de componentes por visão computacional
Trabalhos acadêmicos	4 Trabalhos de Formatura 1 Dissertação de mestrado 4 Artigos publicados
Uso didático	PRO3445 - Planejamento e Controle da Produção (Curso Eng. de Produção) PRO3474 - Projeto do Produto e Processo (Curso Eng. de Produção) PRO2719 - Materiais e Processos de Produção III (Curso Design) PRO5828 - Projeto do Produto e do Processo (Pós-graduação Eng. de Produção) PRO2315 - Ergonomia I (Curso Design) 0323100 - Introdução à Eng. Elétrica (Curso Eng. Elétrica)

4.2.3. Fase 3 – Consolidação

Em 2020, a Fábrica manteve o apoio dos docentes envolvidos, dos mestrandos e estudantes de graduação de apoio operacional, além do apoio financeiro do Fundo Patrimonial Amigos da Poli e dos parceiros da indústria. O convênio de apoio da ABDI se encontra vigente até o fim de 2020, com a previsão de agregação de mais um equipamento (torquímetro) destinado ao demonstrador de Montagem customizada.

Nesse momento (agosto/2020), quatro mestrandos de Engenharia de Produção estão desenvolvendo suas dissertações relacionadas com a Fábrica do Futuro, aplicações didáticas na mesma, e ao tema da gestão do ciclo de vida do produto. Um doutorando está desenvolvendo sua tese com o tema *Digital Twin*. Um doutor está desenvolvendo sua pesquisa de pós-doutorado sobre economia circular. Três artigos foram publicados no período, abordando: o desenvolvimento da configuração inicial da Fábrica (Leal et al., 2020a), o modelo de negócios da Fábrica do Futuro (Leal et al., 2020b) e os demonstradores de visão computacional (Zancul, Martins, Lopes & da Silva Neto, 2020).

Os demonstradores presentes nessa fase são os mesmos que na fase anterior, com algumas melhorias em desenvolvimento (que serão detalhados no tópico 4.3. Demonstradores de tecnologias e conceitos de Indústria 4.0). Além dos demonstradores atuais, existe a intenção de desenvolver ainda demonstradores abordando Economia Circular, Gerenciamento inteligente de energia e Logística inteligente. Tendo superado o desafio inicial de construir a estrutura básica, nesta fase, além do aperfeiçoamento dos demonstradores, os objetivos principais são: alcançar a sustentabilidade do modelo operacional; atrair mais pesquisas para a Fábrica; e oferecer mais aplicações didáticas. Em termos de sustentabilidade, foi oferecida a Disciplina de Desenvolvimento Integrado de Produtos no primeiro semestre de 2020, na qual empresas parceiras propuseram desafios de Indústria 4.0 para os alunos, e se encontra em fase de desenvolvimento um curso introdutório de Indústria 4.0, a ser oferecido no segundo semestre para profissionais da indústria (educação continuada). A Disciplina de Desenvolvimento Integrado de Produtos (que será melhor detalhada no tópico 4.4 Aplicações didáticas na Fábrica do Futuro) teve grande relevância nessa fase, porque consolidou a parceria entre a Fábrica do Futuro e as empresas parceiras e ainda aplicou tecnologia para a solução de problemas reais, enquanto promoveu o aprendizado para dezenas de alunos de graduação. Nesse contexto, destaca-se o desenvolvimento de nove provas de conceito conforme demandas reais de empresas de manufatura de diferentes setores (bens de consumo, automotivo, eletrônicos, alimentos e material de construção).

Existe a intenção de desenvolver mais modalidades de cursos a serem oferecidos anualmente, bem como oferecer anualmente a Disciplina de Desenvolvimento Integrado de Produtos, e ainda buscar novas fontes de financiamento para projetos de pesquisa específicos ligados à Fábrica do Futuro. A Tabela 9 resume as características principais da terceira fase, que ainda se encontra em execução. Os textos marcados em cinza na tabela indicam ações ainda não concluídas.

Tabela 9: Características da 3ª fase de implementação da Fábrica do Futuro

Implementação da Fábrica do Futuro - Fase 3: Consolidação	
Objetivo/Foco	Consolidação da Fábrica
Período	2020 – 2021

Recursos humanos	2 docentes Dep. Eng. de Produção Poli USP 1 docente Dep. Eng. Mecatrônica Poli USP 2 docentes Dep. Eng. de Sistemas Eletrônicos Poli USP 1 docente curso Mecatrônica Insper 4 mestrandos Dep. Eng. de Produção Poli USP 3 estudantes de graduação
Apoio de empresas	27 empresas apoiadoras
Financiamento	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) Fundo Patrimonial Amigos da Poli (recursos recebidos em 2019) Disciplina de Desenvolvimento Integrado de Produtos Curso de Indústria 4.0 para profissionais atuantes no mercado
Demonstradores idealizados	D1 - Montagem customizada D2 - Controle de qualidade por visão computacional D3 - Produto conectado D4 - Manufatura aditiva e Monitoramento remoto D5 - <i>Digital Twin</i> D6 - Identificação de componentes D7 - Monitoramento de máquinas e Manufatura distribuída D8 - Separação de componentes por visão computacional
Trabalhos acadêmicos	3 Artigos publicados 4 mestrandos Dep. Eng. de Produção Poli USP desenvolvendo dissertação 1 doutorando Dep. Eng. de Produção Poli USP desenvolvendo tese 1 doutor Dep. Eng. de Produção Poli USP desenvolvendo pesquisa de pós-graduação
Uso didático	0303410 - Desenvolvimento Integrado de Produtos (multidisciplinar)

4.3. Demonstradores de tecnologias e conceitos de Indústria 4.0

Neste tópico serão detalhados os demonstradores implementados na Fase 2, que estão sendo aprimorados na Fase 3. A Figura 30 apresenta a localização dos demonstradores na Fábrica:

- D1 - Montagem customizada;
- D2 - Controle de qualidade por visão computacional;
- D3 - Produto conectado;
- D4 - Manufatura aditiva e Monitoramento remoto;
- D5 - *Digital Twin*;
- D6 - Identificação de componentes;
- D7 - Monitoramento de máquinas e Manufatura distribuída;
- D8 - Separação de componentes por visão computacional.

Além dos espaços de demonstração, existe ainda um Almoxarifado onde ficam armazenados equipamentos e componentes para uso em projetos, e uma sala de projetos com mesas e espaço para prototipação. A mesma televisão utilizada no demonstrador de monitoramento remoto (Demonstrador 7) pode ser utilizada em palestras e aulas, e fica localizada na “sala de aula” da Fábrica do Futuro, que tem capacidade para 25 pessoas (Figura 31). Os equipamentos, componentes, materiais e demonstradores são abertos para uso em projetos de alunos, grupos de pesquisa, grupos de extensão, por professores etc. A Fábrica do Futuro conta ainda com a assistência do InovaLab@Poli⁸, que possui salas de projeto, impressoras 3D e uma oficina mecânica e eletrônica para suporte ao desenvolvimento de soluções. Além disso, existe uma relação próxima entre a Fábrica do Futuro e o InovaLab@Poli com iniciativas de fomento ao empreendedorismo na universidade de maneira que, caso surjam oportunidades de negócio a partir de algum desenvolvimento realizado na Fábrica do Futuro, existe possibilidade de suporte ao empreendedor.

Figura 30: Planta da Fábrica do Futuro e localização demonstradores

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2020

⁸ Para mais informações, acessar: <http://inovalab.poli.usp.br/>

Figura 31: Sala de aula da Fábrica do Futuro

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

4.3.1. Produto demonstrador: skate conectado

Conforme explicitado por Tisch et al. (2015) e Abele et al. (2019), o produto utilizado em uma Fábrica de Aprendizagem pode apresentar diferentes características em termos de origem, formato, comercialização, funcionalidade, número de componentes e variantes, etc. Wagner et al. (2014) destacam que o produto de Fábricas de Aprendizagem pode se diferenciar de um produto convencional em seu processo de produção, objetivo, características, etc. Os autores afirmam ainda, sobre o desenvolvimento de um produto para uso em uma Fábrica de Aprendizagem, que “o objetivo desse processo de desenvolvimento é maximizar a experiência de aprendizado, bem como o desempenho educacional e de pesquisa.” (Wagner et al., 2014, p.195).

A escolha do produto para a Fábrica do Futuro possuiu alguns critérios norteadores, conforme citado anteriormente, como a maximização da experiência de aprendizado, as possibilidades de demonstração de tecnologia no processo produtivo e montagem do skate, a manutenção da flexibilidade e capacidade de adaptação da

Fábrica, as possibilidades de integração de serviços, as possibilidades de customização, etc. Nesse sentido, após discussão e análise de diferentes opções de produtos entre os participantes iniciais do projeto, o produto definido foi um skate, tendo como foco seu processo de montagem.

O skate é um produto disponível no mercado, amplamente conhecido, presente no dia-a-dia de muitas pessoas, de montagem simples, e que permite diferentes níveis de personalização e customização. Tendo em consideração a sustentabilidade e manutenção da Fábrica no longo prazo, o produto ainda apresenta fácil desmontagem, sendo possível o reuso na linha de produção em diferentes ciclos antes de seu desgaste total. Com isso, a frequência de reposição de matéria-prima é reduzida. Atualmente existem 40 kits para montagem de skate distribuídos entre o estoque armazenado, processo de montagem (em cada uma das estações de trabalho) e montados. A Figura 32 apresenta um skate padrão da Fábrica (sem componentes opcionais) e a Figura 33 apresenta a estrutura básica do skate e seus componentes.

Figura 32: Skate padrão da Fábrica do Futuro

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

Figura 33: Componentes do skate

Fonte: Hupfeld (2018)

Desde a escolha do produto, foi considerada a possibilidade de transformá-lo em um produto inteligente, que tenha a capacidade de coletar informações sobre seu uso e oferecer serviços complementares aos usuários, bem como proporcionar um maior entendimento de seus usos, que pode ser utilizado para a melhoria de novas versões do próprio produto. Com a ajuda de um graduando em Engenharia Elétrica, por meio do seu Trabalho de Formatura (Morgado, 2019), foi desenvolvida uma primeira versão do que seria a “caixa de conectividade”, um dispositivo para a coleta e transmissão de dados a ser acoplado ao skate, bem como o desenvolvimento de um sistema para armazenamento e visualização desses dados e de informações que podem ser geradas a partir desses dados. Mais detalhes serão apresentados na descrição do demonstrador D3 – Produto conectado.

4.3.2. Linha de montagem do skate

A linha de montagem do skate funciona como o fio condutor que conecta os demonstradores presentes na Fábrica do Futuro. O projeto da linha de montagem do skate integra alguns conceitos de *lean manufacturing*, como o sistema puxado, redução de estoque, redução dos tempos de setup, garantia da qualidade, *poka-yoke*

(redução de erros), balanceamento da linha, etc. porém, adaptações foram realizadas visando permitir a demonstração de tecnologias de maneira mais compreensível e didática ao longo da linha de montagem.

O processo de montagem simplificado se inicia com as escolhas de customização do pedido por meio de um configurador de produto, que é acessado via tablet (pode ser acessado também pelo computador via browser); em seguida, na Estação de Trabalho 1, é realizada a montagem do *truck* e do *shape*; na Estação de Trabalho 2 é realizada a montagem das rodas; na Estação de Trabalho 3 é aplicado o torque no *truck* do skate; na Estação de Trabalho 4 são incluídos os itens opcionais selecionados. Na Estação de Trabalho 5 (ou Estação de desmontagem) o skate é desmontado para reuso. Este processo é representado na Figura 34. A Figura 35 apresenta a linha de montagem e as estações de trabalho, numeradas de 1 a 4 e a Estação de desmontagem numerada como 5. A Figura 36 apresenta os fluxos de montagem e abastecimento, bem como as posições das estações de trabalho originalmente definidas por Hupfeld (2018).

Figura 34: Processo de montagem o skate

Figura 35: Linha de montagem e as Estações de Trabalho 1 a 5

Fonte: Cassoli (2019)

Figura 36: Fluxos de montagem e abastecimento definidos originalmente

Fonte: Hupfeld (2018)

Em cada estação de trabalho estão posicionados: estoque de componentes; monitor, teclado e mouse para acesso ao sistema de suporte à produção (MES); ferramentas de montagem; e suporte para posicionamento do skate. O estoque de componentes foi otimizado para o fluxo da linha de produção e a reposição de estoque das estações de trabalho é feita por meio de um carrinho de *milkrun* (Figura 43) pelo centro da linha de produção (Hupfeld, 2018). Além dessas 5 estações de trabalho (Figuras 37 a 41), fazem parte da linha um armário fixo e um armário móvel para estocagem das componentes (Figura 42), e ainda um armário móvel para o estoque de produto acabado (Figura 43). Desde a concepção inicial, na definição do mobiliário da Fábrica, foi considerada a necessidade de manter e flexibilidade e capacidade de adaptação da mesma. Por isso, muitos dos itens são móveis, e os demais itens são produzidos com componentes padrão da indústria, de maneira a facilitar alterações (altura da bancada, posição dos trilhos nas bancadas, localização na Fábrica, etc.)

Figura 37: Estação de Trabalho 1 - Montagem *shapes* e *trucks*

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2020

Figura 38: Estação de Trabalho 2 – Montagem das rodinhas

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

Figura 39: Estação de Trabalho 3 – Aplicação do torque

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

Figura 40: Estação de Trabalho 4 – Montagem de itens opcionais

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

Figura 41: Estação de desmontagem

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

Figura 42: Armário fixo e armário móvel para estocagem de componentes

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

Figura 43: Armário móvel para o estoque de produtos acabados e carrinho de *milkrun*

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

4.3.3. D1 - Montagem customizada

Com a finalidade de demonstrar as possibilidades de customização em massa, foram introduzidos parâmetros de variabilidade no skate. Na primeira versão, apresentada na Fase 1, as opções de customização incluíam o *shape*, *truck* e rodinhas. Na versão atual, as opções de customização incluem: quatro opções de cores das rodinhas traseiras e frontais, sendo que ambas as rodinhas traseiras devem ter a mesma cor, e ambas as rodinhas frontais devem ter a mesma cor; torque aplicado no *truck*, em escala de 1 a 10 (de macio a rígido); a opcional caixa de conectividade, que pode ser incluída ou não no produto; e o opcional *rails*, que também podem ser incluídos ou não no produto.

A escolha da cor das rodinhas é uma questão puramente estética. A escolha no torque se justifica porque o nível de torque aplicado no *truck* do skate pode facilitar certos tipos de manobras. A caixa de conectividade é o envoltório no qual são incluídos os sistemas de coleta e transmissão de dados. Dado que a versão atual do skate conectado ainda não apresenta uma versão realística da caixa de conectividade para o uso, para efeitos de demonstração, foi desenvolvida uma estrutura simplificada para representar a caixa de conectividade (componente azul na Figura 45). Os *rails* são estruturas aplicadas no skate para aumentar a durabilidade do *shape*, evitando seu desgaste por causa da prática de certas manobras, portanto, os *rails* funcionam como uma proteção, sofrendo desgaste no lugar do *shape*. Das opções de customização apresentadas, a do nível de torque se encontra disponível no configurador de produto, mas ainda não pode ser realizada na prática, pois demanda um torquímetro especial, que possa aplicar exatamente o torque desejado, bem como a integração dos sistemas MES com o sistema do torquímetro. Um modelo adequado foi adquirido recentemente e se encontra em processo de entrega. A Tabela 10, adaptada de Cassoli (2019), detalha as variáveis e parâmetros atuais do skate.

Tabela 10: Variáveis e parâmetros de customização do skate

Variável	Parâmetros
Dimensões	Fixa – apenas um tipo de <i>shape</i> disponível
Material	Fixo – apenas um tipo de material disponível
Rodinhas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tamanho: fixo ▪ Dureza: fixo ▪ Cor: 4 variantes, 2 posições (dianteira e traseira)

<i>Truck</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tamanho: fixo ▪ Torque: ajustável, escala de 1-10
Estampa	Fixa – apenas logo da Fábrica do Futuro disponível
Caixa de conectividade	Opcional – cliente seleciona ou não
<i>Rails</i>	Opcional – cliente seleciona ou não

Fonte: adaptado de Cassoli (2019)

Os *rails* e caixa de conectividade fazem a conexão com o demonstrador D4 - Manufatura aditiva e Monitoramento remoto, sendo impressos nas impressoras 3D, e a montagem é realizada na Estação de Trabalho 4. As figuras abaixo apresentam um skate com todos os itens opcionais montados (Figura 45), e um skate desmontado com todas os componentes integrantes, inclusive os opcionais (Figura 46).

Figura 44: Skate montado com todos os itens opcionais

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

Figura 45: Skate desmontado com todos os itens opcionais

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

Para dar suporte ao processo de montagem de pedidos, foram instalados um sistema de Enterprise Resource Planning (ERP) e um sistema de Manufacturing Execution System (MES). Cada um dos sistemas foi instalado por uma empresa parceira e a integração entre os sistemas já havia sido desenvolvida anteriormente em função de uma parceria entre as empresas. Cada software foi instalado em um servidor virtual que fica hospedado na Nuvem da Universidade de São Paulo. A Figura 46 ilustra a organização de acesso aos softwares MES e ERP instalados. Nas três primeiras estações de trabalho, o sistema MES é acessado por meio de computadores, porém, na Estação de Trabalho 4 (Figura 47), o sistema MES é acessado por meio de uma placa projetada para a Internet das Coisas (*Single Board Computer*), com capacidade de processamento de um computador. A placa, chamada de Labrador, foi desenvolvida e produzida no âmbito do programa “Caninos Loucos Single Board Computers (SBCs) abertas para Internet das Coisas (IoT)”⁹ do Centro Interdisciplinar de Tecnologias Interativas (CITI) e um exemplar foi cedido para uso na Fábrica do Futuro.

Figura 46: Organização de acesso aos softwares MES e ERP

⁹ Para mais informações, acessar: <https://caninosloucos.org/pt/>

Figura 47: Estação de Trabalho 4 com placa Labrador destacada em vermelho

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

O demonstrador de montagem customizada se inicia com a coleta do pedido, feito por meio de uma interface de configuração do skate, chamado de configurador de produto, que é executado em uma página web acessada por meio de um tablet da Fábrica do Futuro. Essa interface foi desenvolvida por uma das empresas parcerias da Fábrica, fornecedora de softwares de gestão empresarial, que também fornece o sistema ERP utilizado. A Figura 48 apresenta as etapas do configurador de produto. Na primeira página, é inserido o nome do cliente. Na segunda página, o cliente seleciona as opções de cores de rodinhas que são incluídas e atualizadas instantaneamente na imagem do skate, de forma que o cliente possa visualizar como seu skate final se assemelhará. Logo abaixo, na mesma página, o cliente pode selecionar a inclusão dos *rails* e caixa de conectividade (seleção de opcionais - sim/não), bem como a aplicação do torque (1 a 10). A imagem final do skate apresenta um skate completo com caixa de conectividade (azul) e *rails* (cinza). A última parte apresenta a confirmação do pedido.

Figura 48: Etapas do configurador de produto

Fonte: Cassoli (2019)

Figura 49: Configurador de produto no tablet

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

Após a seleção de customização do skate no configurador de produto, é enviada uma ordem de produção para sistema ERP, que envia a mesma para o sistema MES. O MES, por sua vez, inclui a ordem na lista de pedidos e envia para cada estação de trabalho as instruções de montagem, considerando as personalizações incluídas. Em cada estação de trabalho, o operador abre o pedido, verifica as instruções de montagem e, após a montagem do pedido, preenche um *checklist* de atividades e conclusão de montagem no sistema MES. Na última estação de trabalho, ao finalizar as atividades, o sistema MES envia para o ERP a informação de conclusão do pedido. A Figura 50 ilustra essa integração.

Figura 50: Integração entre os sistemas MES e ERP desde o pedido até a montagem

Fonte: adaptado de Cassoli (2019)

4.3.4. D2 - Controle de qualidade por visão computacional

O demonstrador de visão computacional fica localizado na Estação de Trabalho 2 (Figura 51). Com o apoio de uma startup de soluções de visão computacional parceira da Fábrica, foi instalada uma câmera inteligente (Figura 52), de fabricação da própria startup acima da Estação de Trabalho 2, na qual são montadas as rodinhas. A câmera é operada a partir de um aplicativo próprio de visão computacional (Figura 53), também desenvolvido pela startup em questão, que foi integrado ao sistema MES e se conecta à rede da Fábrica por cabo, mas pode se conectar ainda por wifi e 4G.

O objetivo é realizar a verificação das cores das rodinhas montadas no skate com as cores escolhidas no pedido. Quando o operador marca a atividade de montagem das rodinhas como concluída no MES, o sistema envia automaticamente a solicitação de verificação para a aplicação de visão computacional, que realiza a

conferência. A aplicação de visão computacional retorna para o sistema MES a informação positiva ou negativa para a conferência e, em caso negativo, informa qual posição e cor estão erradas. Essa informação é apresentada para o operador, que realiza o retrabalho, finaliza a tarefa, e uma nova solicitação de controle é realizada. A Estação de Trabalho 2, diferentemente das demais, possui dois monitores que permitem acompanhar tanto o sistema MES, quanto o aplicativo de visão computacional, que mostra a visão da câmera e aponta visualmente as rodas montadas de maneira correta e errada. A Figura 54 ilustra a integração entre o aplicativo de visão computacional e o sistema MES. Mais informações sobre este demonstrador podem ser encontradas em Zancul et al. (2020).

Figura 51: Estação de Trabalho 2 e componentes de visão computacional

Fonte: Zancul et al. (2020)

Figura 52: Câmera inteligente

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

Figura 53: Aplicativo de visão computacional

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2020

Figura 54: Integração entre a aplicação de visão computacional e o sistema MES

4.3.5. D3 - Produto conectado

O produto conectado abarca um sistema eletrônico integrado ao skate que tem como objetivo a coleta e a transferência de dados acerca do uso do skate, que podem ser transformados em informação tanto para o usuário, como para o fabricante. O sistema eletrônico é dividido em dois módulos: um módulo que utiliza um sensor magnético alocado na rodinha do skate para o cálculo da velocidade e distância percorrida (Figura 55), que ainda se conecta à luzes LED posicionadas no skate (Figura 56) e permite acender ou apagar as mesmas por acionamento à distância; e outro módulo que verifica a posição e orientação do skate com uso de um acelerômetro e um giroscópio (Figura 57). Os dados coletados podem ser visualizados em uma página web desenvolvida exclusivamente para essa finalidade (Figura 58). Maior detalhamento da solução pode ser encontrado em Morgado (2019).

Figura 55: Cálculo da velocidade e distância percorrida

Fonte: Morgado (2019)

Figura 56: Luzes LED instaladas no skate

Fonte: Morgado (2019)

Figura 57: Identificação da posição e orientação do skate

Fonte: Morgado (2019)

Figura 58: Demonstrador do Produto conectado

Fonte: Morgado (2019)

Uma pequena aplicação de realidade aumentada foi realizada no demonstrador de Produto conectado para demonstração do uso de realidade aumentada para recuperar informações, com potencial de aplicação na indústria em montagem, manutenção, armazenamento, inspeção etc. Foi aplicado um marcador no demonstrador que, por meio do software de visão aumentada, apresenta o nome do demonstrador (Figura 59).

Figura 59: Aplicação de realidade aumentada

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

4.3.6. D4 - Manufatura aditiva e Monitoramento remoto

Os *rails* e a caixa de conectividade, itens opcionais do skate e de fácil produção, são bons candidatos à produção em baixa escala e à produção personalizada em termos de formato, cores e tipos de material. Portanto, esses itens são produzidos por manufatura aditiva. Apesar da possibilidade de customização da caixa de conectividade e *rails*, atualmente eles são produzidos em tamanho, cor e material padrão, pois esses parâmetros de customização ainda não foram incluídos na estrutura de produto no sistema ERP nem no configurador de produto.

Na Fase 1 de implementação da Fábrica do Futuro, foram instalados sensores em uma impressora 3D regular de maneira a coletar as informações essenciais de impressão para acompanhar e controlar a produção à distância. Na Fase 2 da Fábrica do Futuro, essa adaptação não foi necessária, pois foi adquirida uma impressora 3D (DDDropevo Twin) que já possui sensores e câmeras instalados, bem como um aplicativo que permite monitorar a produção. A Figura 60 apresenta o software proprietário de controle da DDDropevo Twin e a Figura 61 apresenta a impressão de *rails* a partir da câmera da impressora.

Figura 60: Controle remoto da impressora 3D

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

Figura 61: Produção de *rails* por manufatura aditiva

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

Atualmente se encontra em desenvolvimento a integração entre os sistemas dessa máquina e o sistema MES, de maneira colaborativa entre as duas empresas fornecedoras. O objetivo da integração é que, quando um pedido incluir *rails* e/ou caixa de conectividade, o sistema MES envie automaticamente para a impressora 3D uma ordem de produção para que seja produzido um substituto para reposição de estoque, representando a integração de sistemas na cadeia produtiva.

De maneira a aumentar as possibilidades de aplicações de manufatura aditiva e seu uso pela comunidade da universidade e empresas parceiras, a Fábrica possui, no total, quatro impressoras 3D: uma Cloner ST G3, duas DDDrop Evo Twin e uma Markforged Mark II. A Tabela 11 apresenta uma comparação entre as máquinas disponíveis. A Figura 62 apresenta as quatro impressoras de três modelos diferentes na Fábrica do Futuro.

Tabela 11: Comparação entre os três modelos de impressora 3D da Fábrica do Futuro

Características	Cloner ST G3	DDDrop Evo Twin	Markforged Mark II
Volume de impressão	320 mm x 210 mm x 210 mm (LxPxA)	330mmx310mmx305mm (LxPxA)	320 mm x 132 mm x 154 mm (LxPxA)

Filamentos	PLA, ABS, PETG, FLEX, NYLON	PLA, ABS, PETG, FLEX, HIPS, PVA (solúvel em água)	Plástico: Onyx Fibras: Fibra de carbono, Fibra de vidro, Kevlar, Fibra de vidro de alta resistência e alta temperatura (HSHT)
Resolução da camada z	400 a 50 microns	700 a 50 microns	100 microns
Controle remoto	Não	Iniciar, pausar, controlar temperatura, ajustar mesa, velocidade de impressão (movimentação do extrusor), extrusão (a vazão do bico), gravar, fotografar.	Apenas iniciar e pausar
Software proprietário	Matter Control Plataforma	Módulo DDROP SMART	Cloud Eiger software
Impressão com dois materiais / extrusores	Não	2 extrusores. Possível imprimir em 2 cores diferentes	2 extrusores. Possível fazer estrutura interna de suporte em qualquer uma das fibras e a camada externa apenas em Onyx.
Conectividade/ Comunicação	USB, Cartão de memória MicroSD	LAN, WI-Fi, USB, painel touchscreen a cores de 7 polegadas, Cartão de Memória SD	Wifi, USB, Painel touchscreen a cores de 4.3

Figura 62: Impressoras 3D da Fábrica do Futuro.

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2020

4.3.7. D5 - *Digital Twin*

O demonstrador de *Digital Twin* (DT) se encontra fase de implementação por um pós-graduando por meio de seu projeto de doutorado. Um segundo pós-graduando, no nível mestrado, está desenvolvendo a aplicação da gestão do ciclo de vida do produto (PLM) que também impacta o demonstrador. O DT em implementação na Fábrica funciona como um *Digital Twin* de Circuito Fechado (CLDT), um software intermediário (*middleware*), que coleta dados acerca da fabricação do produto (dados do fabricante), bem como dados de uso do consumidor (dados em tempo real) para, a partir desse conjunto de dados, gerar informações úteis para o consumidor, bem como para a fabricante.

Em dados do fabricante, o DT coleta informações do PLM, do ERP e do MES instalados na Fábrica. Em dados em tempo real, o DT coleta informações do skate conectado. As Figura 63 ilustra os softwares utilizados na Fábrica do Futuro ao longo do ciclo de vida do produto e a Figura 64 apresenta a integração do Digital Twin com os demais softwares. O DT transforma os dados de ambos os lados em informações e aplicações úteis. Por exemplo, a partir dos dados de fabricação do produto e dos dados de uso da velocidade média e distância viajada, o DT pode informar à empresa e ao cliente sobre o momento ideal para a troca das rodinhas.

Figura 63: Softwares utilizados na Fábrica do Futuro ao longo do ciclo de vida do produto

Fonte: Durão, Morgado, Lopes & Zancul (2020).

Figura 64: Integração do *Digital Twin* com os demais softwares

Fonte: Durão, Morgado, Lopes & Zancul (2020).

4.3.8. D6 - Identificação de componentes

A Fábrica do Futuro possui uma impressora de RFID, uma impressora de QR Code, dois leitores de QR Code, e ainda 5 leitores de RFID, estes últimos instalados por uma empresa parceira (Figura 65). O demonstrador de Identificação de componentes, presente na primeira fase da Fábrica, se encontra em fase de reformulação. Atualmente, uma impressora QR Code fica localizada na Estação de Trabalho 1 (Figura 66, destacado em vermelho) e uma integração entre o sistema MES e o sistema de impressão está em operação. Dessa maneira, quando o operador aponta o início do pedido no MES, o sistema envia uma ordem de impressão de etiqueta QR Code a ser instalada no skate. Essa etiqueta carrega a informação da ordem do pedido. Com isso, nas estações de trabalho seguintes, o QR Code pode ser escaneado com o objetivo de confirmar que o operador selecionou o skate correto para a montagem, ou seja, se o número de pedido impresso no QR Code é equivalente ao número de pedido no MES.

Outras aplicações planejadas incluem: Aplicação QR Code - a identificação por QR Code de todos os componentes disponíveis para a montagem do skate, de maneira que o sistema ERP registre o uso dos componentes na montagem e, na

desmontagem, identifique a volta do componente para o estoque e, ainda, a partir dessas informações, que registre quantas vezes o mesmo componente foi utilizado na montagem do skate. Com isso, seria possível identificar a quantidade de ciclos que cada componente do skate consegue suportar antes de ser necessária reposição, o que poderia ajudar no planejamento da reposição dos componentes do skate na Fábrica do Futuro; Aplicação RFID – uso de RFID para controle de estoque de equipamentos da Fábrica que são emprestados aos alunos (sensores, etc.), colocando etiquetas RFID nos mesmos de maneira a identificar automaticamente a saída e entrada desses equipamentos do estoque, integrado com sistema ERP.

Figura 65: Impressoras de QR Code e RFID e leitores de QR Code

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

Figura 66: Estação de Trabalho 1 com impressora e leitor de QR Code

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

4.3.9. D7 - Monitoramento de máquinas e Manufatura distribuída

No laboratório do Insper parceiro da Fábrica, é produzido em um centro de usinagem, *trucks* para o skate, demonstrando o conceito de manufatura distribuída. Dados sobre a usinagem do eixo são coletados e, para a próxima versão desse demonstrador, pretende-se coletar informações do processo de usinagem e utilizar aplicações de Inteligência Artificial para planejamento de manutenção preditiva, por exemplo. A Figura 67 ilustra a relação entre a Fábrica do Futuro e o *hub* no Insper.

Figura 67: Relação entre a Fábrica do Futuro e o *hub* no Insper.

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

Em uma das disciplinas que fez uso da Fábrica do Futuro, um projeto previa o desenvolvimento de um Módulo IoT para coleta de dados em máquinas de um centro de usinagem visando o monitoramento em tempo real do dispositivo. Foi desenvolvido um módulo com sensor de vibração, com blindagem para aumentar a resistência em ambiente inóspito, que coleta e transfere informações para monitoramento. Essa aplicação pode ser acessada pelos funcionários de manutenção em tempo real para que possam tomar decisões de manutenção preventiva.

4.3.10. D8 - Separação de componentes por visão computacional

A segunda aplicação de visão computacional utiliza uma esteira para fazer a separação por cor das rodinhas após a desmontagem. Originalmente, o equipamento (câmera inteligente) foi aplicado para controle de qualidade, verificando componentes do skate, na primeira fase de implementação da Fábrica do Futuro. A aplicação atual,

com inclusão da esteira separadora, consegue separar as rodinhas provenientes da desmontagem por cores. As rodinhas são colocadas no início da esteira e, ao passarem pela câmera inteligente, a cor da rodinha é identificada e com o auxílio de um atuador e de um pistão pneumático, a rodinha é empurrada para fora da esteira para uma das bandejas de separação, de acordo com sua cor.

Esse demonstrador foi desenvolvido inicialmente em versão reduzida (Figura 68) com o apoio de oito estudantes do grupo de extensão PET Mecânica (Programa de Educação Tutorial), do curso de Engenharia Mecânica da Poli. Após o teste de conceito, foi instalada a versão em tamanho real (Figuras 68 e 69), utilizando equipamentos da empresa parceira de visão computacional. Mais informações sobre este demonstrador podem ser encontradas em Zancul et al. (2020). A esteira, a câmera e o separador podem ser utilizados para diferentes aplicações. O demonstrador já foi utilizado, por exemplo, para a verificação de erros em peças estampadas e para o controle de qualidade de pães.

Figura 68: Versão reduzida e em tamanho real do Demonstrador 8

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

Figura 69: Separação de componentes por visão computacional

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

4.4. *Aplicações didáticas na Fábrica do Futuro*

Desde sua implementação, a Fábrica do Futuro abrigou sete aplicações didáticas: disciplinas “Planejamento e Controle da Produção” (2019) e “Projeto do Produto e Processo” (2019) do curso de Engenharia de Produção; disciplina “Projeto do Produto e do Processo” da pós-graduação em Engenharia de Produção (2019); disciplinas “Ergonomia I” (2019) e “Materiais e Processos de Produção III” (2019) do curso de Design; disciplina “Introdução à Eng. Elétrica” (2019) do curso de Engenharia Elétrica; e a disciplina “Desenvolvimento Integrado de Produtos” (2020), que é oferecida pela Eng. de produção, porém aberta para estudantes de qualquer curso, apresentando caráter interdisciplinar. Em algumas das disciplinas, a Fábrica foi utilizada para demonstração de um projeto produtivo realístico e em outras foi aplicada uma abordagem didática ativa baseada em projetos centrados na Fábrica.

No caso das disciplinas de graduação “Projeto do Produto e Processo” (73 alunos), “Materiais e Processos de Produção III” (41 alunos), e da disciplina de pós-graduação “Projeto do Produto e do Processo” (6 alunos), houve visita na Fábrica do Futuro, que foi utilizada para dar contexto aos projetos que os alunos desenvolveram, porém, os projetos eram de escolha livre dos alunos.

No curso de Planejamento e Controle da Produção, a turma (100 alunos) foi dividida em grupos menores (25 alunos) que realizaram visita à Fábrica do Futuro, na qual os alunos foram inicialmente apresentados à Fábrica e ao processo de montagem do skate e, em seguida, divididos em grupos por estação de trabalho. Os alunos então executaram o processo de montagem do skate e reposição de estoque (Figura 70),

medindo os tempos de produção, de maneira a inserir os alunos em um processo produtivo real. Para aplicações futuras, os docentes da disciplina planejam a inserção de mais componentes e oportunidades de customização do skate, de maneira a aumentar a variabilidade de tornar o processo de montagem mais complexo, para que seja aplicado como trabalho da disciplina um projeto de sequenciamento de produção dos pedidos da Fábrica do Futuro.

Figura 70: Alunos do curso de Planejamento e Controle da Produção

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

No curso de Ergonomia I, inicialmente foi apresentada à turma (27 alunos) a Fábrica e o processo de montagem do skate (Figura 71). Os alunos foram convidados a identificar oportunidade de melhoria no mobiliário e no processo do ponto de vista ergonômico. Divididos em grupos, eles escolheram uma oportunidade de melhoria e desenvolveram um projeto visando solucionar o problema identificado. Os alunos utilizaram livremente o espaço da Fábrica do Futuro, sua estrutura e ferramentas

disponíveis. Cada um dos seis grupos formados apresentou sua solução final para toda a classe ao final do curso.

Figura 71: Alunos do curso de Ergonomia I

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

No curso de Introdução à Eng. Elétrica foi aplicada a mesma abordagem do curso de Ergonomia, na qual a turma (46 alunos) foi inicialmente apresentada à Fábrica e ao processo de montagem do skate, e em seguida os alunos foram convidados a identificar oportunidade de melhoria na montagem do skate, aplicando conhecimentos de Eng. Elétrica. Também divididos em grupos, eles escolheram uma oportunidade de melhoria e desenvolveram um projeto visando solucionar o problema identificado (Figura 72). Os alunos utilizaram livremente o espaço da Fábrica do Futuro, se utilizando da estrutura e ferramentas disponíveis. Cada um dos onze grupos apresentou sua solução final para toda a classe ao final do curso.

Figura 72: Alunos do curso de Introdução à Engenharia Elétrica

Fonte: Acervo da Fábrica do Futuro, 2019

No curso de Desenvolvimento Integrado de Produtos, os alunos foram introduzidos aos principais conceitos de Indústria 4.0, bem como ao processo de desenvolvimento de produto. Em seguida, a turma (66 alunos) foi dividida em nove grupos interdisciplinares. Cada grupo recebeu o desafio, dentro do contexto da Indústria 4.0, de solucionar um problema real e único formulado por uma empresa parceira. Os projetos possuíam as seguintes características: três desafios foram trazidos por uma empresa do setor automotivo - localização indoors de ferramentas na Fábrica, coleta de dados em máquinas do centro de usinagem para monitoramento em tempo real e aplicativo para digitalização do processo de avaliação 5S; dois desafios foram trazidos por empresas do setor alimentício – melhoria do processo de *picking* e inspeção final de qualidade da embalagem; dois desafios foram trazidos por empresas de bens de consumo – inspeção final de produtos e inspeção de qualidade de placas de circuito impresso; um desafio foi apresentado por empresa do setor de construção visando automatização do processo de estampagem de perfis de alumínio; um desafio trazido por uma ONG – criação de um aplicativo para incentivar a devolução de garrafas de vidro para reciclagem.

A disciplina é dividida em etapas, e se inicia com o entendimento do problema e geração de ideias de soluções, e em seguida, os alunos constroem protótipos para testar as ideias e selecionar a de maior potencial para desenvolvimento. Conforme o avanço da disciplina, os protótipos vão crescendo em complexidade e resolução e, ao final da disciplina, os alunos apresentam uma prova de conceito, um protótipo final. Inicialmente, era previsto que os alunos utilizassem o espaço e as ferramentas e equipamentos disponíveis na Fábrica do Futuro. Porém, a maior parte do desenvolvimento foi realizado à distância dadas as restrições de circulação por causa da pandemia de Sars-Cov2, e os alunos utilizaram ferramentas de ideação e prototipagem online, e as aulas foram realizadas de maneira virtual bem como as apresentações. Apesar das limitações impostas pelo distanciamento social, a qualidade dos protótipos e soluções conseguiu ser mantida e a disciplina foi considerada bem sucedida, resultando em nove provas de conceito de Indústria 4.0. A Tabela 12 resume todas as aplicações didáticas realizadas na Fábrica do Futuro

Tabela 12: Aplicações didáticas na Fábrica do Futuro

Disciplina	Curso	Uso da Fábrica	Ano	Alunos
Planejamento e Controle da Produção	Graduação em Engenharia de Produção	Visita, demonstração e exercício do processo de montagem do skate pelos próprios alunos	2019	100
Projeto do Produto e Processo	Graduação em Engenharia de Produção	Visita e demonstração; contexto para projeto livre.	2019	73
Projeto do Produto e do Processo	Pós-graduação em Engenharia de Produção	Visita e demonstração; contexto para projeto livre.	2019	6
Ergonomia I	Graduação em Design	Visita, demonstração e projeto de melhoria na Fábrica.	2019	27
Materiais e Processos de Produção III	Graduação em Design	Visita e demonstração; contexto para projeto livre.	2019	41
Introdução à Eng. Elétrica	Graduação em Engenharia Elétrica	Visita, demonstração e projeto de melhoria na Fábrica.	2019	46
Desenvolvimento Integrado de Produtos	Multidisciplinar	Visita, demonstração e projeto de desenvolvimento de produto fornecido por empresa parceira	2020	66

4.5. Definição e Classificação Morfológica da Fábrica do Futuro

Dada a caracterização anteriormente apresentada, a Fábrica do Futuro será analisada a partir da definição e classificada e morfologia desenvolvida pelo grupo de pesquisa em Fábricas de Aprendizagem (*CIRP CWG on Learning factories*) e apresentada nos trabalhos de Tisch et al., 2015; Abele et al., 2019. Relativo à definição, a Fábrica do Futuro pode ser considerada uma Fábrica de Aprendizagem no sentido estrito, já que apresenta uma cadeia de valor real e um produto físico sendo manufaturado, além de possuir um canal de comunicação local, pois não apresenta um ambiente de aprendizado remoto estruturado. A manufatura manual dificulta o controle remoto, mas outras aplicações podem ser realizadas de maneira remota, considerando a estrutura de sistemas em Nuvem. A Fábrica do Futuro já conta com

processos, configuração, produto, conceito didático e objetivos bem definidos. Alguns desses objetivos, especialmente relacionados ao modelo operacional sustentável, ainda se encontram em fase de desenvolvimento e expansão, como treinamento para a indústria e financiamento para pesquisa. A Tabela 13 detalha esses aspectos.

Tabela 13: Visão geral Fábrica do Futuro como Fábrica de Aprendizagem no sentido restrito

Uma Fábrica de Aprendizagem, em um **sentido restrito**, é um ambiente de aprendizado especificado por:

processos autênticos, que inclui várias estações de trabalho e compreende aspectos técnicos e organizacionais	Atende
configuração que pode ser alterada e se assemelha a uma cadeia de valor real	Atende
produto físico sendo fabricado	Atende
conceito didático que compreende a aprendizagem formal, informal e não formal, possibilitada pelas próprias ações dos estudantes em uma abordagem de aprendizagem no local	Atende
Dependendo do objetivo da Fábrica de Aprendizagem, o aprendizado ocorre por meio de ensino, treinamento e/ou pesquisa. Consequentemente, os resultados da aprendizagem podem ser o desenvolvimento de competências e/ou inovação	Objetivos de ensino em relação aos estudantes de graduação está estabelecido. Em termos de pesquisa, ainda está em busca de modelo sustentável que permita expandir os financiamentos. Em termos de treinamento para a indústria, se encontra em construção.
É desejável um modelo operacional que garanta a operação sustentável da Fábrica de Aprendizagem.	Em construção.

Em relação à classificação das dimensões da morfologia, este trabalho atualiza a classificação da Fábrica do Futuro feita anteriormente por Grotti (2019), a partir de avanços realizados e pretendidos na Fábrica do Futuro. As cores de preenchimento utilizadas representam: verde – inteiramente aplicável, azul – aplicável em algum nível e amarela – planejado para o futuro.

4.5.1. Dimensão Modelo de operação

A Fábrica do Futuro foi idealizada e implementada na Universidade de São Paulo e conta com professores, pesquisadores, estudantes assistentes e especialistas

técnicos (parceria com outros laboratórios). O desenvolvimento foi realizado dentro da própria universidade, com colaboradores internos, mas também com apoio de outras universidades, empresas e laboratórios. Os recursos iniciais de implementação foram uma combinação de recursos internos (editais de fomento, espaço físico, docentes, pesquisadores, alunos), recursos públicos (editais de fomento), além de recursos privados (Fundo Patrimonial Amigos da Poli, parcerias com empresas). O financiamento da operação combina também recursos internos com recursos públicos e privados. Já a continuidade do financiamento se encontra em desenvolvimento, e se baseia em na oferta de disciplinas em parceria com a indústria e cursos para profissionais atuantes no mercado, bem como financiamento para projetos de pesquisa específicos. Para as próximas etapas, existe o planejamento da oferta de cursos abertos (periodicamente) e fechados (conforme a demanda). A Figura 73 apresenta a classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Modelo de operação.

Figura 73: Classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Modelo de operação.

		Instituições acadêmicas			Instituições não acadêmicas					Organização com fins lucrativos	
1.1	Operação	Universidade	Faculdade	BA	Ensino médio/vocacional	Câmara	Sindicato	Associação de funcionários	Rede industrial	Consultoria	Companhia produtora
1.2	Instrutor	Professor		Pesquisador	Estudante assistente		Especialista técnico			Consultor	Educador
1.3	Desenvolvimento	Desenvolvimento próprio			Desenvolvimento com apoio externo				Desenvolvimento externo		
1.4	Financiamento inicial	Recursos internos			Recursos públicos				Recursos privados		
1.5	Financiamento em operação	Recursos internos			Recursos públicos				Recursos privados		
1.6	Continuidade do financiamento	Financiamento de curto prazo (ex: eventos únicos)			Financiamento de médio prazo (ex: projetos e programas <3 anos)				Financiamento de longo prazo (ex: projetos e programas > 3 anos)		
1.7	Modelo de negócio para treinamentos	Modelo aberto			Modelo fechado (Programa de treinamento apenas para companhias únicas)						
		Modelo de Clube	Taxas por cursos								

4.5.2. Dimensão Objetivos e Metas

A Fábrica do Futuro tem como objetivos principais e educação e pesquisa e, como secundários, o oferecimento de um ambiente para pilotos e provas de conceitos em Indústria 4.0, bem como transferência de inovação. Os públicos-alvo principais de educação são os graduandos e pós-graduandos e os profissionais atuantes no

mercado. O perfil do grupo de atuação é heterogêneo, envolvendo profissionais com diferentes formações, provenientes de diferentes departamentos, e em diferentes níveis hierárquicos. A Fábrica não possui uma indústria-alvo e apresenta tecnologias possíveis de serem aplicadas em diferentes setores. Apesar disso, ela pode não ser útil para alguns setores como o químico, têxtil, de construção etc., por causa de restrições de implementação dos processos dessas indústrias. Mesmo assim, empresas do setor alimentício e de bebidas, por exemplo, se encontram no grupo de empresas usuárias, tendo desenvolvido provas de conceito relacionadas ao processo de *picking* e de inspeção de embalagens. Os conteúdos de ensino têm como foco atualmente a Indústria 4.0, desenvolvimento de produto, gestão da produção, engenharia industrial e design, mas para as próximas etapas, planeja expandir para abordar outros tópicos como *lean manufacturing* e eficiência energética. A Fábrica do Futuro atuou desde o princípio como um facilitador de pesquisa, mas foi também em grande parte o objeto de pesquisa (principalmente nas primeiras fases de implementação). Para as próximas fases, considerando que a implementação da Fábrica já foi realizada, é esperado que ela atue mais como facilitador do que como objeto de pesquisa. Os tópicos de pesquisa são variados e não fixos, mas tem como foco a Indústria 4.0 e seus impactos. A Figura 74 apresenta a classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Objetivos e metas.

Figura 74: Classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Objetivos e metas.

2.2	Objetivo secundário	Ambiente de teste/ Piloto			Produção industrial		Tranferência de inovação			Imagem pública				
2.3	Público-alvo para educação e treinamento	Crianças/ Escolas	Estudantes			Empregados						Trabalhador independente	Desempregados	Público aberto
			Graduação	Mestrado	Doutorado	Aprendizes	Qualificados	Semi-qualificados	Não qualificados	Gestores				
Nível baixo	Nível médio									Nível alto				
2.4	Perfil do grupo	Homogêneo	Heterogêneo (nível de conhecimento, hierarquia, estudantes + funcionários, etc.)											
2.5	Indústrias-alvo	Mecânica		Automotiva		Logística		Transporte		Bens de consumo rápido		Aeroespço		
		Química		Eletrônicos		Construção		Bancos e seguradoras		Têxtil		...		
2.6	Conteúdo de ensino	Indústria 4.0	Processo de criação de produto		Gestão e Organização da produção		Engenharia industrial		Design / Ergonomia		Eficiência energética e de recursos		Gestão Lean	...
2.7	Papel da LF em pesquisa	Objeto de pesquisa						Facilitador de pesquisa						
2.8	Tópicos de pesquisa	Indústria 4.0	Ensino de Engenharia		Digital Twin		PLM		Economia circular		Processo de criação de produto		Smart product	...

4.5.3. Dimensão Processo

No ciclo de vida de produto da Fábrica do Futuro existem algumas possibilidades em planejamento, desenvolvimento e prototipagem, principalmente em termos de variações e adicionais. Alguns itens podem ser manufaturados, mas o foco principal é na montagem. Para o futuro, existe a expectativa de repensar o produto a partir do ponto de vista da economia circular. Em termos de ciclo de vida da Fábrica, existe flexibilidade de conceito, de planejamento do processo, e até mesmo para aplicações didáticas. O ciclo de vida do produto é abordado desde a configuração do pedido até a montagem. Na Fábrica do Futuro, a produção acontece principalmente de maneira pontual para demonstração, mas suporta a produção em pequenas séries, como na demonstração da disciplina de Planejamento e Controle da Produção descrita anteriormente. O processo é organizado em estações de trabalho (bancadas), seguindo um fluxo lógico de montagem manual. O método de manufatura usa principalmente a combinação de componentes e a manufatura aditiva. A Figura 75 apresenta a classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Processo.

Figura 75: Classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Processo.

3.1	Ciclo de vida do produto	Planejamento do produto	Desenvolvimento do produto		Prototipagem	Manufatura	Montagem	Logística	Serviço	Economia circular
3.2	Ciclo de vida da fábrica	Planejamento do investimento	Conceito da fábrica	Planejamento do processo	Aceleração				Manutenção	Economia circular
3.3	Ciclo de vida do pedido	Configuração & pedido	Sequenciamento das ordens	Planejamento e programação					Seleção e embalagem	Envio
3.4	Ciclo de vida da tecnologia	Planejamento	Desenvolvimento	Teste virtual					Manutenção	Modernização
3.5	Funções indiretas	Atividades primárias				Atividades secundárias				
		Logística de entrada & saída	Marketing & vendas	Serviços	Infraestrutura	Recursos humanos	Desenvolvimento de tecnologia	Compras		
3.6	Fluxo de materiais	Produção contínua					Produção discreta			
3.7	Tipo de processo	Produção em massa		Produção serial	Produção em pequenas séries			Produção pontual		
3.8	Organização da manufatura	Local fixo		Bancadas		Oficina		Fluxo		
3.9	Nível de automação	Manual			Parcialmente automatizado/híbrido		Completamente automatizado			
3.10	Método de manufatura	Combinação	Manufatura aditiva	Corte	Modelagem primária	Revestimento		Mudança propriedades do material		
3.11	Tecnologia de manufatura	Físico			Químico			Biológico		

4.5.4. Dimensão Configuração

As práticas de ensino atuais se concentram principalmente em aspectos físicos, e os sistemas de suporte são utilizados principalmente em pesquisa. A configuração é feita por estações de trabalho em uma célula em U, em escala reduzida em relação a uma fábrica padrão de skates. Sistemas de informação para todo o ciclo de vida estão disponíveis, algumas integrações entre os sistemas foram desenvolvidas e outras se encontram em fase de desenvolvimento. A Figura 76 apresenta a classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Configuração.

Figura 76: Classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Configuração

Ambiente de ensino	Puramente físico	Fábrica física suportada por fábrica digital	Cadeia de valor física estendida virtualmente		Puramente virtual	
Escala do ambiente	Reduzido			Tamanho real		
Sistema de trabalho	Estação	Célula	Sistema	Segmento	Fábrica	Rede
Facilitadores para flexibilidade	Mobilidade	Modularidade	Compatibilidade	Escalabilidade	Universalidade	
Dimensões de flexibilidade	Produto	Processo	Organização		Prédio & Layout	
Integração de TI	TI antes do procedimento operacional padrão (CAD, CAM, simulação, Digital Twin)		TI depois durante procedimento operacional padrão (ERP, MES, Digital Twin)		TI depois da produção (PLM, Digital Twin)	

4.5.5. Dimensão Produto

O produto demonstrador da Fábrica do Futuro é material (skate conectado). O skate não é um produto desenvolvido pela Fábrica, mas sim um produto desenvolvido externamente, completamente funcional, e disponível no mercado. Porém, algumas das variações, como o uso de manufatura aditiva tiveram desenvolvimento próprio, bem como o desenvolvimento da caixa de conectividade. Apesar do skate ser um produto funcional, o skate conectado ainda não é, pois o dispositivo de conectividade ainda não se encontra em uma versão realística para uso funcional. A quantidade de componentes do skate pode variar, mas a versão mais simples, sem os itens opcionais, inclui 8 componentes (Figura 33). O skate possui 320 variantes atualmente (4 opções de cores de rodinhas em 2 posições diferentes, 10 opções de torque, 2 opções - sim/não – para a caixa de conectividade, 2 opções - sim/não – para os *rails*).

A quantidade de variantes é flexível e pode ser modificada de acordo com a necessidade, reduzindo ou aumentando a quantidade de parâmetros de variabilidade. Os skates produzidos são utilizados para exibição de cada etapa de montagem, bem como do skate concluído, e aqueles que não ficam como exibição são desmontados e seus componentes voltam para o estoque. A Figura 77 apresenta a classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Produto.

Figura 77: Classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Produto.

5.1	Materialidade	Material (produto)			Imaterial (serviço)		
5.2	Forma do produto	Carga geral		Produtos a granel		Fluxo de produtos	
5.3	Origem do produto	Desenvolvimento próprio		Desenvolvimento pelos participantes		Desenvolvimento externo	
5.4	Comercialização do produto	Disponível no mercado		Disponível no mercado, porém simplificado didaticamente		Não disponível no mercado	
5.5	Funcionalidade do produto	Produto funcional		Adaptado didaticamente com função limitada		Sem função/aplicação, apenas para demonstração	
5.6	Nº de diferentes produtos	1 Produto	2 Produtos	3-4 Produtos	>4 Produtos	Flexível, desenvolvido por participantes	Aceita pedidos reais
5.7	Nº de variantes	1 Variante	2-4 Variantes	5-20 Variantes	320	Flexível, desenvolvido por participantes	Determinado por pedidos reais
5.8	Nº de componentes	1 Componente	2-5 Componentes	6-20 Componentes	21-50 Componentes	51-100 Componentes	>100 Componentes
5.9	Utilização continuada do produto	Reuso/ reciclagem		Exibição	Doação	Venda	Descarte

4.5.6. Dimensão Didática

Desde sua concepção, a Fábrica foi utilizada em diferentes aplicações didáticas. O leque de aplicações é amplo, e cada professor de cada disciplina pode utilizar da maneira considerada mais adequada. De maneira geral, a dimensão de aprendizado desenvolvida é a cognitiva, e as competências têm relações mais com a técnica e implementação de atividades, porém, as aplicações de ensino ativo, com autogestão do projeto e apresentações dos conceitos permite desenvolver também competências pessoais, sociais e de comunicação. A maioria das disciplinas utilizada a Fábrica do Futuro para demonstração ou como cenário aberto para desenvolvimento de projetos, porém, na disciplina de Planejamento e Controle da Produção, se encontra em desenvolvimento um projeto de aumento da variabilidade do produto da Fábrica para a criação de um cenário de produção mais complexo, no qual as estações de trabalho e suas posições são modificada de maneira a manter uma linha não otimizada, criando um cenário básico fechado, sob o qual os alunos devem trabalhar para otimizar, e também para sequenciar os pedidos de produção. A maioria

das aplicações foram realizadas de maneira a melhorar o ambiente existente, mas existem ainda aplicações de projetos da disciplina, de pós graduandos, e de empresas parceiras em conjunto com alunos, para desenvolver novas aplicações e, possivelmente, novos demonstradores de tecnologia para a Fábrica. A maioria do aprendizado é realizado no local, de maneira autoguiada e auto-organizada, com apoio de apresentador e instrutor (professores) e uso de seminários, disciplinas e projetos. Alguns desenvolvimentos foram realizados a distância, como consequência da pandemia de Sars-Cov2, mas a Fábrica não possui um ambiente remoto de aprendizado organizado. Existe a expectativa de desenvolvimento de cursos para a indústria ainda ao longo de 2020. Os treinamentos atualmente são padronizados, mas podem ser customizadas de acordo com as necessidades da indústria no futuro. Em termos de fundamentação teórica, cada disciplina que fez uso do ambiente aplicou uma metodologia diferente, algumas apresentando de maneira prévia à visita, outras de maneira concomitante, e existe ainda as fundamentações teóricas que surgem a partir das necessidades dos projetos em desenvolvimento. As avaliações aplicadas na disciplina foram feitas principalmente por meio de relatórios e apresentação oral. A avaliação do uso da Fábrica é realizada a partir do nível de aprendizado dos participantes e do próprio *feedback* dado por eles, apesar de não haver ainda um modelo padrão de avaliação do uso da Fábrica, que ainda é feito de maneira informal. A Figura 78 apresenta a classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Didática.

Figura 78: Classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Didática

6.1	Classes de competências	Técnica e metodológica		Comunicação & social	Pessoais	Orientado à implementação e atividades	
6.2	Dimensões de aprendizado	Cognitiva		Afetiva		Psicomotora	
6.3	Estratégia de cenários de aprendizado	Instrução	Demonstração	Cenário fechado		Cenário aberto	
6.4	Tipo de ambiente de ensino	Greenfield (desenvolvimento do ambiente da fábrica)			Brownfield (melhoria do ambiente de fábrica existente)		
6.5	Canal de comunicação	Aprendizado no local (no ambiente da fábrica)			Conexção remota (com o ambiente de aprendizado)		
6.6	Nível de autonomia	Instruído	Autoguiado / Autoregulado		Autodeterminado / Auto-organizado		
6.7	Papel do treinador	Apresentador	Moderador	Coach		Instrutor	
6.8	Tipo de treinamento	Tutorial	Curso prático de laboratório		Seminário	Oficina	Projeto
6.9	Padronização dos treinamentos	Padronizado			Customizado		
6.10	Fundamentação teórica	Pré-requisito	Anterior	Alternado com partes práticas		Baseado na demanda	Após
6.11	Níveis de avaliação	Feedback dos participantes	Aprendizado dos participantes	Transferência para uma fábrica real	Impacto econômico do treinamento	Retorno do treinamento (ROI)	
6.12	Avaliação do sucesso de aprendizado	Teste de conhecimentos (escrito)	Teste de conhecimentos (oral)	Relatório escrito	Apresentação oral	Exame prático	Nenhum

4.5.7. Dimensão Métricas

A Fábrica do Futuro ainda não possui metas bem definidas, nem treinamentos determinados, mas dos 7 usos didáticos já aplicados, o tamanho das classes variou entre 6 a 100 alunos, com duração de um semestre para projetos de desenvolvimento, e de 1 dia para os que realizaram apenas visitação. Para o curso em desenvolvimento, ainda não existe determinação de número de participantes, duração, etc. No ano de 2019, 293 alunos participaram em aplicações didáticas na Fábrica do Futuro. No ano de 2020, até o momento, 66 alunos participaram. Essa queda pode ser explicada em parte por causa da Pandemia de Sars-Cov2. A Fábrica do Futuro possui cerca de 290m² de área sem as salas de projeto, escritório e almoxarifado que, somados, constituem menos que 100m². Atualmente a Fábrica não possui nenhum profissional dedicado em tempo integral, porém, somando as horas de dedicação entre os diferentes participantes, o total gira em torno de 2-4 FTE (full time equivalente), variando de acordo com as necessidades do período. A Figura 79 apresenta a classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Métricas.

Figura 79: Classificação da Fábrica do Futuro na Dimensão Métricas.

7.1	Nº participantes por treinamento	1-5 participantes	6-10 participantes	11-15 participantes	16-30 participantes	>30 participantes
7.2	Nº treinamentos padronizados	1 treinamento	2-4 treinamentos	5-10 treinamentos		>10 treinamentos
7.3	Duração média de um treinamento	1 dia	>1 a ≤2 dias	>2 a ≤5 dias	>5 a ≤10 dias	>10 a ≤20 dias > 20 dias
7.4	Participantes por ano	< 50 participantes	50-200 participantes	201-500 participantes	501-1000 participantes	>1000 participantes
7.5	Utilização da capacidade	< 10%	>10% a ≤20%	>20% a ≤50%	>50% a ≤75%	> 75%
7.6	Tamanho da LF	> 100 m ²	>100m ² a ≤300m ²	>300m ² a ≤500m ²	>500m ² a ≤1000m ²	> 1000m ²
7.7	Equivalente (FTE) a tempo completo na LF		< 1	2-4	5-9	10-15 > 15

5. DISCUSSÃO

No capítulo anterior foram descritos os demonstradores da Fábrica do Futuro, suas fases de implementação, aplicações didáticas, resultados alcançados, definição e classificação em relação à morfologia de Fábricas de aprendizagem. Neste capítulo será realizada uma análise crítica da implementação da Fábrica do Futuro em vista da literatura de Fábricas de aprendizagem e da literatura de Indústria 4.0.

5.1. *Análise da Fábrica do Futuro em relação à Indústria 4.0 e suas tecnologias*

A Fábrica do Futuro, desde sua concepção, tem como foco a demonstração de tecnologias e aplicações da Indústria 4.0, bem como a transferência de conhecimentos acerca do tópico. Atualmente, a Fábrica do Futuro cobre aspectos da Indústria 4.0 como o produto conectado, internet das coisas, sistemas embarcados, flexibilidade na produção, manufatura distribuída, monitoramento remoto, customização em massa, identificação individual de componentes e manufatura aditiva. Em comparação com a literatura sobre Indústria 4.0, é possível perceber que os pontos fortes da Fábrica do Futuro, em termos de tecnologias habilitadoras, se tratam da integração de sistemas, computação em Nuvem, manufatura aditiva e uso de Inteligência Artificial para aplicações de visão computacional. Desenvolvimentos em termos de Simulações, Big Data e Inteligência Artificial se encontram em andamento, relacionados aos Demonstradores de *Digital Twin* e Monitoramento de máquinas e Manufatura distribuída. A Tabela 14 lista as tecnologias abordadas em cada demonstrador. Os círculos preenchidos apontam tecnologias já aplicadas e os círculos vazios indicam tecnologia em desenvolvimento.

A integrações de sistemas abordada na Fábrica do Futuro atualmente demonstram integrações verticais (intra-empresa) e, em algum nível, de engenharia de ponta a ponta, ainda em desenvolvimento no *Digital Twin*. Nesse sentido, a Fábrica é bem sucedida em demonstrar não apenas a integração de sistemas de gestão empresariais, como a integração entre o MES e o ERP, mas também a integração de outras tecnologias de Indústria 4.0 aos sistemas empresariais, como a integração entre a câmera de visão computacional e o MES e a integração entre a impressora 3D e o MES (ainda em desenvolvimento). Apesar disso, existe ainda o potencial para desenvolver melhor a integração entre os sistemas da Fábrica aos sistemas de

fornecedores de sua cadeia de suprimentos. A integração entre a impressora 3D e o MES apresenta potencial para demonstrar uma integração horizontal, se for considerado um modelo de negócios no qual a empresa não tem posse da impressora 3D, mas que envia o pedido direto para o fornecedor, que tem a posse da impressora e realiza a produção solicitada. Os *hubs* da Fábrica do Futuro também têm potencial para ilustrar a integração horizontal, ou seja, entre a cadeia de suprimentos e aplicações logísticas, porém, até o momento, ainda não existe sistemas integrados entre os *hubs*.

Tabela 14: Tecnologias de Indústria 4.0 abordadas nos Demonstradores da Fábrica

	D1 – Montagem customizada	D2 – Controle de qualidade por visão computacional	D3 – Produto conectado	D4 –, Manufatura aditiva e monitoramento remoto	D5 – <i>Digital Twin</i>	D6 – Identificação de componentes	D7 – Monitoramento de máquinas e Manufatura distribuída	D8 – Separação de componentes por visão computacional
Robôs Industriais Autônomos								
Inteligência Artificial		●					○	●
Simulações					○			
Integração de sistemas	●	●	●	○	●	●		
Internet das Coisas	●		●		●			
Cibersegurança								
Computação em Nuvem	●	●	●	●	●		●	
Big Data Analytics					○		○	
Manufatura Aditiva	●			●				
Realidade Aumentada			●					

As integrações de sistemas realizados na Fábrica do Futuro são todas hospedadas na Nuvem. A Fábrica utiliza aplicações de Computação em Nuvem de Infraestrutura como serviço (IaaS), com o uso de servidores que atuam como computadores virtuais; de Software como serviço (SaaS), no caso dos sistemas como

o ERP e o MES; e ainda de Plataforma como serviço (PaaS), na qual os usuários desenvolvem aplicações próprias, no caso do desenvolvimento do *Digital Twin*.

O skate conectado, apesar de representar um avanço em direção a um produto inteligente e possuir os três elementos principais (componentes físicos, componentes inteligentes e componentes de conectividade) listados por Porter e Heppelmann (2015), ainda não pode ser considerado um produto inteligente, pois, apesar da sua capacidade de monitorar algumas de suas próprias condições, ainda não permite o controle de remoto de operações complexas executadas pelo produto, não possui aplicações de otimização da performance do produto, e nem autonomia do mesmo. Apesar disto, o skate conectado funciona como um bom exemplo de aplicação de Internet das Coisas, já que atinge quase todas as camadas da arquitetura de Internet das Coisas de Alcácer de Cruz-Machado (2019): camada de sensoriamento, camada de rede e camada de interface. Na quarta e última camada, a camada de serviços, apresenta apenas a visualização de algumas informações e apenas uma função que pode ser controlada (acendimento das luzes). Portanto, existe ainda a oportunidade de desenvolvimento de serviços agregados ao skate, e até mesmo de um *Smart PSS*. O demonstrador de *Digital twin* visa desenvolver algumas aplicações nesse sentido. Se faz necessário destacar também que skate conectado ainda é um protótipo, existindo então a oportunidade de miniaturização da caixa de conectividade para o desenvolvimento de um produto completamente funcional.

A linha de produção ainda se encontra no paradigma de customização em massa, pois integra o consumidor no processo produtivo e permite a configuração de variantes por meio de modularidade, mas não permite a adaptação do design básico, ou seja, da estrutura do produto. A literatura da Indústria 4.0 já trata de produção personalizada em massa, no qual a própria estrutura básica do produto pode ser customizada, o que demanda alterações não apenas no sistema produtivo, mas também em tantos outros sistemas de negócios da empresa. Portanto, existe ainda potencial para desenvolvimento da produção personalizada em massa e demonstração das mudanças necessárias para a aplicação da mesma.

Relativo às tecnologias da Indústria 4.0 mapeadas na literatura, os Robôs Industriais Autônomos, Cibersegurança, Simulações e *Big Data Analytics* são as únicas não cobertas na Fábrica do Futuro. É compreensível a falta de Robôs Industriais Autônomos dado o alto custo de aquisição dos mesmos. O mesmo se aplica ao *Big Data Analytics*, dada a dificuldade de coletar dados em larga escala,

especialmente em um ambiente produtivo reduzido. Mesmo levando em consideração as limitações de espaço físico e até mesmo da capacidade de representação de um espaço fabril, existem ainda muitas oportunidades de desenvolvimento de demonstradores em termos de aplicações e tecnologias de Indústria 4.0, como Realidade aumentada, Cibersegurança, Simulações, aplicações de Inteligência Artificial, Internet das coisas, Manufatura aditiva para produção de peças complexas, aplicações de Realidade aumentada, etc.

Em relação às características da Indústria 4.0, são demonstrados conceitos como interoperabilidade na integração dos sistemas e flexibilidade por meio do uso da modularidade em seus componentes, que permitem adaptação às diferentes mudanças. Os esforços de virtualização trazidos pelo *Digital Twin* têm potencial para disponibilização de dados em tempo real e aplicação de simulações. A integração das tecnologias em torno do processo produtivo do skate merece reconhecimento, já que ajuda a oferecer um contexto coerente de produção para a demonstração de diferentes tecnologias e conceitos de Indústria 4.0 e facilitar a demonstração das mesmas. Apesar disso, existe ainda potencial para integração entre o produto e seu processo produtivo, já que atualmente as integrações são centradas no sistema MES, e não na troca informações fornecidas com próprio produto.

Além do potencial de avanço dos demonstradores, existe ainda grande potencial em termos de aplicação do conhecimento desenvolvido na Fábrica do Futuro sobre as tecnologias e aplicações de Indústria 4.0 (como integração de sistemas e visão computacional) para solução de problemas reais da Indústria, por meio de projetos de pesquisa com a indústria, por exemplo. Os recursos disponíveis, como a placa de internet das coisas (Labrador), a câmera inteligente, a esteira reparadora, as impressoras 3D etc., permitem apoiar uma ampla gama de testes e avaliações de aplicações de Indústria 4.0, oferecendo flexibilidade em suas aplicações.

5.2. *Análise da implementação da Fábrica do Futuro em relação à Fábricas de Aprendizagem*

A literatura de Fábricas de Aprendizagem apresenta um modelo de morfologia que abrange a classificação de uma fábrica já existente, além disso, existe pouca literatura relatando as etapas de implementação de uma Fábrica de Aprendizagem de maneira detalhada. Abele et al. (2019), relatam três abordagens possíveis para o

planejamento de uma Fábrica de Aprendizagem: a perspectiva de uma fábrica, a perspectiva do aprendizado; e a perspectiva integrada de ensino e fábrica. O autor cita propostas de abordagens lineares e sequenciais para o desenvolvimento de Fábricas de Aprendizagem, similares às fases do ciclo de vida de um produto. Porém, todos os trabalhos citados, com exceção de Tisch e Metternich (2017) se encontram na língua alemã.

Em Tisch & Metternich (2017), os autores propõem um modelo de ciclo de vida de Fábricas de Aprendizagem linear e sequencial, que inclui atividades de: planejamento, sendo o espaço físico o recurso crítico; desenvolvimento, sendo a equipe o recurso crítico; a construção, sendo os recursos financeiros o ponto crítico; vendas e aquisição (venda de cursos para a indústria, por exemplo - dependendo do modelo de negócios da fábrica), sendo os parceiros e equipe os recursos críticos; uso da fábrica e treinamentos, sendo o modelo operacional sustentável o recurso crítico; e, por fim, a remodelagem/reciclagem da fábrica, sendo a integração de pesquisas recentes ao ambiente de fábrica o recurso crítico.

O caso estudado, portanto, diverge da proposta de Tisch & Metternich (2017) ao adotar uma abordagem não linear e sequencial em termos de espaço físico, recursos humanos e financeiros, operação e aplicação de ensino. Planejamento, desenvolvimento, construção, aplicações de ensino, parcerias etc. são realizados de maneira iterativa e/ou contínuas, e não sequenciais. A implementação se dá em fases, nas quais recursos humanos e financeiros, operação e aplicações de ensino evoluem gradativamente, e cada fase contribui para a viabilização da fase seguinte. A flexibilidade garantida no processo, no produto e no *layout* permitem adaptação para manter a Fábrica de Aprendizagem alinhada às pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos.

O modelo de morfologia de Fábricas de Aprendizagem e as dimensões propostas por Tisch et al. (2015) e Abele et al. (2019) podem fornecer um direcionamento sobre quais tipos de decisões são necessárias para o estabelecimento de uma Fábrica de Aprendizagem. As Dimensões de Modelo de Operação e Objetivo são bons candidatos a decisões iniciais, dado que todas as outras dimensões (Produto, Processo, Configuração, Didática e Métricas) parecem ser consequências das mesmas. As Dimensões de Produto, Processo e Configuração possuem grande influência uma sobre a outra, e dificilmente poderiam ser planejadas isoladamente. A Tabela 15 apresenta os principais aspectos, para cada uma das dimensões da Fábrica

de Aprendizagem, que foram desenvolvidos em cada fase de implementação da Fábrica do Futuro. O texto marcado em negrito e itálico destaca as mudanças mais significativas em cada uma das etapas.

Na primeira fase, o foco foi o estabelecimento de uma estrutura mínima de demonstração de tecnologias e aplicações de Indústria 4.0. Essa fase inicial foi importante para a que o grupo obtivesse maior compreensão acerca de Fábricas de Aprendizagem e de Indústria 4.0; contato com parceiros; validação do piloto do Fábrica de Aprendizagem; engajamento do corpo docente e discente; e ainda atrair o interesse da gestão da universidade. Nessa fase, os alunos já tiveram participação ativa ao contribuir com a desenvolvimento das características da Fábrica do Futuro.

Tabela 15: Dimensões da Fábrica do Futuro em cada fase

	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Modelo de operação	<ul style="list-style-type: none"> - Desenvolvimento interno com assistência externa - Recursos internos e externos privados 	<ul style="list-style-type: none"> - Desenvolvimento interno com assistência externa - Recursos internos, externos públicos e privados 	<ul style="list-style-type: none"> - Desenvolvimento interno com assistência externa - Recursos internos, externos públicos e privados - Modelo aberto e fechado de taxas por cursos
Objetivo	<ul style="list-style-type: none"> - Ambiente de teste/Piloto - Objeto de Pesquisa 	<ul style="list-style-type: none"> - Ambiente de teste/Piloto - Objeto de Pesquisa - Educação 	<ul style="list-style-type: none"> - Ambiente de teste/Piloto - Facilitador de Pesquisa - Educação
Produto	<ul style="list-style-type: none"> Skate customizado - Todas as peças padrão - 2 níveis de variabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> Skate customizado e conectado - 2 Peças produzidas por manufatura aditiva - 4 níveis de variabilidade - Caixa de conectividade 	<ul style="list-style-type: none"> Skate conectado customizado e - 2 Peças produzidas por manufatura aditiva - 4 níveis de variabilidade - Caixa de conectividade
Processo	<ul style="list-style-type: none"> - Configuração do pedido - Montagem 	<ul style="list-style-type: none"> - Configuração do pedido ERP - Sistema ERP - Montagem MES - Planejamento e Programação - Manufatura aditiva 	<ul style="list-style-type: none"> - Configuração do pedido ERP - Sistema ERP - Montagem MES - Planejamento e Programação - Manufatura aditiva

Configuração	<ul style="list-style-type: none"> - Ambiente físico - Estações - Flexibilidade no Produto, Processo e Organização - TI: Configurador de produtos 	<ul style="list-style-type: none"> - Ambiente físico - Estações e célula - Flexibilidade no Produto, Processo, Organização e Layout - TI: Configurador de produtos, CAD, PLM, ERP, MES 	<ul style="list-style-type: none"> - Ambiente físico estendido virtualmente - Estações e célula - Flexibilidade no Produto, Processo, Organização e Layout - TI: Configurador de produtos, CAD, PLM, ERP, MES - Digital twin
Didática	<ul style="list-style-type: none"> - Visitação e demonstração 	<ul style="list-style-type: none"> - Visita e demonstração - Exercício de execução do processo produtivo por parte dos alunos - Contexto para projetos livres 	<ul style="list-style-type: none"> - Provas de conceito de Indústria 4.0 - Projetos em parceria com a indústria
Métricas	<ul style="list-style-type: none"> - < 100 m² - 1 FTE - Sem treinamentos 	<ul style="list-style-type: none"> - >300m² a ≤500m² - 2-4 FTE - 6 disciplinas de 3 cursos 	<ul style="list-style-type: none"> - >300m² a ≤500m² - 2-4 FTE - Uso em aberto para aplicações de diferentes disciplinas - Disciplina aberta a diferentes cursos - Cursos para a indústria

Como consequência do aprendizado e engajamento conquistados na primeira fase, foi possível ter alocado um espaço físico maior, bem como a experiência e apoio institucional e de parceiros necessária para a submissão da proposta para o edital de fomento da ABDI. Esses recursos garantiram a expansão da Fábrica do Futuro de maneira significativa na fase seguinte. Na segunda fase, além da expansão do ambiente físico e dos demonstradores, e de um engajamento ainda maior da comunidade acadêmica e participação de parceiros, aplicações didáticas intensivas e complexas puderam ser implementadas. Nessa fase, inclusive, a Fábrica do Futuro recebeu a visita de membros da Associação Brasileira de Internet Industrial (ABII),

como parte do 9º Encontro Nacional da ABII¹⁰. Além de contribuir com o desenvolvimento dos demonstradores da Fábrica do Futuro, os alunos puderam fazer uso do espaço também em aplicações em disciplina, algumas delas em abordagens ativas de ensino.

Dada a ampliação da Fábrica do Futuro e aproximação com a indústria realizadas da segunda fase, foi possível a execução da disciplina de Desenvolvimento Integrado de Produtos, que conecta alunos e empresas, e desenvolve aplicações em projetos reais de Indústria 4.0 no primeiro semestre de 2020, e se planeja o oferecimento de cursos para profissionais atuantes no segundo semestre de 2020, em busca de um modelo de negócios sustentável para a Fábrica do Futuro. Nessa fase, além da possibilidade de utilização por disciplinas e desenvolvimento de demonstradores, os alunos começam a interagir diretamente com a Indústria para desenvolvimento de projetos de Indústria 4.0 por meio da Fábrica do Futuro. Os aprendizados provenientes de cada uma das fases de implementação tiveram um papel central na definição das fases seguintes, garantindo o alinhamento da implementação às necessidades mais atuais e desenvolvimentos tecnológicos.

Relativo às dimensões da morfologia de Fábricas de Aprendizagem, no caso da Fábrica do Futuro, o Modelo de Operação e o Objetivo foram definidos para o curto e para o longo prazo, começando com os recursos disponíveis para construir um projeto piloto e com isso alcançar mais recursos para expansão; priorizando a demonstração de tecnologias para uso em aplicações didáticas e pesquisa; e tendo como foco as tecnologias de Indústria 4.0. Em seguida, as próximas decisões tomadas foram relativas ao Produto, Processo e Configuração, mantendo em todos esses aspectos a flexibilidade necessária para que o projeto fosse escalável e pudesse evoluir de maneira contínua. As aplicações didáticas foram evoluindo em complexidade, em seu princípio servindo apenas para demonstração, e em seguida evoluindo para uso em disciplinas variadas e aplicações ativas de ensino, para o foco em aplicações de Indústria 4.0.

A estrutura da Fábrica e seus equipamentos permitem ainda flexibilidade e capacidade de adaptação tanto para aplicações de curto prazo, quanto para atualizações ao longo prazo, a partir da evolução da tecnologia. Por exemplo, as

¹⁰ Para mais informações, acessar: <https://www.abii.com.br/post/2019/06/17/confira-o-que-aconteceu-no-9%C2%BA-encontro-nacional-da-abii>

diferentes opções de impressoras 3D, esteira separadora e câmera inteligente possuem diversas opções de aplicação. Já o mobiliário permite facilmente a reconfiguração da linha de montagem e dos demonstradores. A estrutura de parcerias como usuárias e fornecedores de tecnologia ajuda a conectar as duas categorias, incentivando adoção de tecnologia e potencializando parcerias e integrações entre as mesmas, assumindo um papel de integração do ecossistema.

O envolvimento dos alunos desde a concepção do projeto da Fábrica do Futuro também merece destaque, ao oferecer um sistema de gestão participativo, colocando os alunos como atores ativos, e não com atores passivos apenas dos resultados. A abertura da Fábrica do Futuro para projetos de extensão, aplicações de disciplinas e até mesmo projetos pessoais dos alunos incentiva um modelo de corresponsabilidade, na qual os alunos assumem parte da responsabilidade sobre a manutenção dos equipamentos, organização e espaço físico da Fábrica.

Como possibilidade de melhorias futuras, se destacam: o estabelecimento de um modelo operacional sustentável; a manutenção da participação ativa de alunos, tanto em aplicações didáticas, como em aplicações outras, como projetos de extensão, por exemplo; o engajamento do ecossistema de empresas usuárias e fornecedoras, bem como a promoção de interação entre elas e a comunidade acadêmica; e a expansão de aplicações de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias, bem como suas transferência para a indústria.

O estudo de caso da Fábrica do Futuro oferece, portanto, um modelo de implementação de Fábricas de aprendizagem alternativa ao modelo Tisch e Metternich (2017), que considera uma evolução gradativa de configuração física, recursos financeiros e humanos, operação, e aplicações no ensino, em fases de implementação, que integra a comunidade docente e discente desde sua concepção.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo preencher uma lacuna de conhecimento acerca da implementação de Fábricas de Aprendizagem com foco em Indústria 4.0 em países em desenvolvimento e, especialmente, no Brasil, respondendo as questões de pesquisa específicas: 1. Como a implementação de uma Fábrica de Aprendizagem para demonstração de tecnologias, ensino e pesquisa de Indústria 4.0, pode ser organizada em fases de evolução, em termos de configuração física, recursos financeiros e humanos, operação, e aplicações no ensino?; 2. Quais as aplicações possíveis da Fábrica de Aprendizagem por fase de implementação?; e 3. Como a estrutura da Fábrica de Aprendizagem implementada segundo as fases adotadas se compara em relação à literatura vigente nas áreas de Fábrica de Aprendizagem e de Indústria 4.0?. Para tal, foi realizado um estudo de caso sobre a Fábrica do Futuro, uma Fábrica de Aprendizagem localizada na Universidade de São Paulo.

Em relação à primeira e segunda questões de pesquisa, o trabalho descreve de maneira detalhada os demonstradores de tecnologias da Indústria 4.0; e ainda as fases de desenvolvimento e implementação dos mesmos, detalhando as etapas executadas em cada fase, fontes de financiamento, apoio em termos de recursos humanos e parceiros e resultados em forma de trabalhos acadêmicos do caso da Fábrica do Futuro. Nesse sentido, a Fábrica do Futuro possui características singulares, como a implementação faseada e gradativa; e ainda o grande envolvimento da comunidade discente e docente desde a concepção da Fábrica de Aprendizagem. A Fábrica do Futuro foi desenvolvida de maneira que os estudantes participaram não apenas como usuários da Fábrica, mas também como protagonistas do desenvolvimento da mesma, colaborando de maneira significativa em cada etapa. O mesmo se aplica às empresas parceiras, que contribuíram para o desenvolvimento da Fábrica desde sua concepção até o momento presente. Ao total, foram impactados pelas atividades da Fábrica do Futuro mais de 350 alunos da graduação; pelo menos 13 alunos de pós-graduação; pelo menos 27 empresas parceiras; pelo menos 7 docentes; com a produção 22 trabalhos acadêmicos, entre dissertações, trabalhos de formatura e artigos.

Em relação à terceira questão de pesquisa (Como a estrutura da Fábrica de Aprendizagem implementada segundo as fases adotadas se compara em relação à literatura vigente nas áreas de Fábrica de Aprendizagem e de Indústria 4.0?), em comparação com a literatura de Fábricas de Aprendizagem, a Fábrica do Futuro consegue atender todos os requisitos para classificação como uma Fábrica de Aprendizagem no sentido estrito e ainda atingir todos os potenciais apontados na Introdução, mesmo que alguns desses potenciais se encontrem atualmente mais desenvolvidos que outros: 1. Ensino prático de engenharia, mantendo maior flexibilidade e capacidade de adaptação da academia; 2. Parceria com a indústria, que viabiliza maior capacitação profissional em vista de desafios reais do mercado do trabalho; 3. Oportunidade de pesquisa e desenvolvimento de soluções reais para a indústria, bem como desenvolvimento acadêmico, envolvendo graduandos, pós-graduandos e acadêmicos; 4. Oportunidade de desenvolvimento e transferência de tecnologia para a indústria, e ainda, atualização profissional de graduandos e profissionais atuantes (educação continuada); 5. Geração de novos negócios. Em relação ao tópico 4, a parte de educação continuada se encontra atualmente em desenvolvimento e em relação ao tópico 5, recentemente, duas das empresas fornecedoras B2B parceiras da Fábrica foram adquiridas por uma grande empresa que está investindo na criação de uma plataforma de Indústria 4.0. Além disso, a Fábrica do Futuro tem startups como parceiros, o que permite conectar as mesmas com grandes empresas também parceiras e potencializar negócios.

A literatura sobre Fábricas de Aprendizagem, conforme detalhado na Revisão da Literatura, possui poucos artigos detalhados publicados em periódicos. A maioria dos trabalhos publicados são concentrados em um congresso específico, que possui a característica de textos curtos que tratam de temas amplos de maneira superficial ou tratam detalhadamente de tópicos específicos. Portanto, o presente trabalho contribui para a literatura e também para a prática, não apenas ao descrever detalhadamente um caso de desenvolvimento de uma Fábrica de Aprendizagem com foco em Indústria 4.0, realizado em fases graduais e com envolvimento constante da comunidade acadêmica e da indústria, mas também ao descrever uma Fábrica de Aprendizagem no Brasil.

Em comparação com a literatura de Indústria 4.0, foi possível identificar que a Fábrica do Futuro apresenta como pontos fortes a integração de sistemas (principalmente verticais), uso de Computação em Nuvem, e uso de Inteligência

Artificial para aplicações de visão computacional. Além disso, a Fábrica abrange conceitos como flexibilidade na produção, manufatura distribuída, monitoramento remoto, customização em massa, identificação individual de componentes e manufatura aditiva. Por outro lado, existe oportunidade de melhoria em aplicações de tecnologias e conceitos de Indústria 4.0 nos demonstradores, como por exemplo, aplicação de simulações, inteligência artificial, integração de sistemas horizontais, cibersegura, *Big Data Analytics*, internet das coisas, avanços em relação ao produto inteligente, aplicações de manufatura aditiva, personalização em massa, *Smart PSS* etc. Em termos de ensino, apesar do oferecimento recente de uma disciplina com foco em Indústria 4.0, um modelo mais estruturado de ensino focado em competências para a Indústria 4.0 seria desejável para garantir uma formação completa.

REFERÊNCIAS

- Abele, E. (2016). Learning factory. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*
- Abele, E., Chryssolouris, G., Sihn, W., Metternich, J., ElMaraghy, H., Seliger, G., ... & Seifermann, S. (2017). Learning factories for future oriented research and education in manufacturing. *CIRP annals*, 66(2), 803-826.
- Abele, E., Metternich, J., & Tisch, M. (2019). Learning Factories. In *Concepts, Guidelines, Best-Practice Examples*. Springer Cham, Switzerland.
- Abele, E., Metternich, J., Tisch, M., Chryssolouris, G., Sihn, W., ElMaraghy, H., ... & Ranz, F. (2015). Learning factories for research, education, and training. *Procedia Cirp*, 32, 1-6.
- Alcácer, V., & Cruz-Machado, V. (2019). Scanning the industry 4.0: A literature review on technologies for manufacturing systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*.
- AMNPO - Advanced Manufacturing National Program Office. (2019). Recuperado de <https://www.manufacturing.gov/>
- Armbrust, M., Fox, A., Griffith, R., Joseph, A. D., Katz, R., Konwinski, A., ... & Zaharia, M. (2010). A view of cloud computing. *Communications of the ACM*, 53(4), 50-58.
- Athinarayanan, R., Newell, B., Garcia, J., Ostanek, J., Diao, X., Sundararajan, R., ... & Richards, G. (2019). Learning in Context with Horizontally & Vertically Integrated Curriculum in a Smart Learning Factory. *Procedia Manufacturing*, 31, 91-96.
- Baena, F., Guarín, A., Mora, J., Sauza, J., & Retat, S. (2017). Learning factory: The path to industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 9, 73-80.
- Baldassarre, F., Ricciardi, F., & Campo, R. (2017). The Advent of Industry 4.0 in Manufacturing Industry: Literature Review and Growth Opportunities. In *DIEM: Dubrovnik International Economic Meeting* (Vol. 3, No. 1, pp. 632-643). Sveučilište u Dubrovniku.
- Barría, C. (2018, 8 de maio). O ambicioso plano 'Made in China 2025' com que Pequim quer conquistar o mundo. *BBC.com*. Recuperado de <https://www.bbc.com/portuguese/internacional-44039447>
- Baygin, M., Yetis, H., Karakose, M., & Akin, E. (2016). An effect analysis of industry 4.0 to higher education. In *2016 15th international conference on information technology based higher education and training (ITHET)* (pp. 1-4). IEEE.
- Bellaiche, A. (2015, 18 de Maio). Adieu les 34 plans, vive les 10 solutions de la Nouvelle France industrielle. *Usinenouvelle.com*. Recuperado de <https://www.usinenouvelle.com/editorial/adieu-les-34-plans-vive-les-10-solutions-de-la-nouvelle-france-industrielle.N329990>
- Carmigniani, J., Furht, B., Anisetti, M., Ceravolo, P., Damiani, E., & Ivkovic, M. (2011). Augmented reality technologies, systems and applications. *Multimedia tools and applications*, 51(1), 341-377.

Cassoli, B. B. (2019) *Product architecture definition and implementation in a Learning Factory focused on Industry 4.0*. (Trabalho de Formatura) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Cheng, Y. W. (2016). *Fábrica POLI: detalhamento de uma Fábrica de Ensino no contexto da Indústria 4.0* (Trabalho de Formatura). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CNI – Confederação Nacional da Indústria. (2020) Recuperado de <http://www.portaldaindustria.com.br/cni/canais/industria-2027/o-projeto/>

Cimini, C., Pezzotta, G., Pinto, R., & Cavalieri, S. (2018). Industry 4.0 technologies impacts in the manufacturing and supply chain landscape: an overview. In *International Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing* (pp. 109-120). Springer, Cham.

Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, 204, 383-394.

da Silva, J. C. (2015). *Fábrica POLI: concepção de uma Fábrica de Ensino no contexto da Indústria 4.0* (Trabalho de Formatura). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Drath, R., & Horch, A. (2014). Industrie 4.0: Hit or hype? [industry forum]. *IEEE industrial electronics magazine*, 8(2), 56-58.

Durão, L. F. C. S., Christ, A., Anderl, R., Schützer, K., & Zancul, E. S. (2016). Distributed manufacturing of spare parts based on additive manufacturing: use cases and technical aspects. *Procedia CIRP*, 57, 704-709.

Durão, L. F. C. S. (2017). *Mass Customization based on additive manufacturing: technology selection, elicitation loop, and distributed production on a tailored customization experiment* (Dissertação de Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo

Durão, L. F. C. S., Carvalho, M. M., & Zancul, E. S. (2017). Industrie 4.0: Formação de Redes de Projeto em Manufatura Distribuída. *Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas*, 12(3), 131-152.

Durão, L. F. C. S., Christ, A., Zancul, E. S., Anderl, R., & Schützer, K. (2017). Additive manufacturing scenarios for distributed production of spare parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(1-4), 869-880.

Durão, L. F. C. S., Carvalho, M. M., Takey, S., Cauchick-Miguel, P. A., & Zancul, E. S. (2018). Internet of things process selection: AHP selection method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(9-12), 2623-2634.

Durão, L. F. C. S., Haag, S., Anderl, R., Schützer, K., & Zancul, E. S. (2018, July). Digital Twin requirements in the context of industry 4.0. In *IFIP International Conference on Product Lifecycle Management* (pp. 204-214). Springer.

Durão, L. F. C. S., Barkoczy, R., Zancul, E. S., Ho, L. L., & Bonnard, R. (2019). Optimizing additive manufacturing parameters for the fused deposition modeling technology using a design of experiments. *Progress in Additive Manufacturing*, 4(3), 291-313.

Durão, L. F. C., Guimarães, M. O., Salerno, M. S., & Zancul, E. (2019). Uncertainty Management in Advanced Manufacturing Implementation: The Case for Learning Factories. *Procedia Manufacturing*, 31, 213-218.

Durão, L. F. C., Morgado, M., Lopes, R. D. & Zancul, E. (2020). Middle of Life Digital Twin: Implementation at a Learning Factory. In *IFIP 17th International Conference on Product Lifecycle*.

Eisenhardt, K. M. (1989). Building theories from case study research. *Academy of management review*, 14(4), 532-550.

Elbestawi, M., Centea, D., Singh, I., & Wanyama, T. (2018). SEPT learning factory for industry 4.0 education and applied research. *Procedia Manufacturing*, 23, 249-254.

EFFRA - European Factories of the Future Research Association (2019). Recuperado de <https://www.effra.eu/>

Enke, J., Glass, R., Kreß, A., Hambach, J., Tisch, M., & Metternich, J. (2018). Industrie 4.0–Competencies for a modern production system: A curriculum for learning factories. *Procedia Manufacturing*, 23, 267-272.

Erol, S., Jäger, A., Hold, P., Ott, K., & Sihn, W. (2016). Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production. *Procedia CIRP*, 54(1), 13-18.

Feliciano Filho, M., Liao, Y., Loures, E. R., & Junior, O. C. (2017). Self-aware smart products: systematic literature review, conceptual design and prototype implementation. *Procedia Manufacturing*, 11, 1471-1480.

FMI (2019). *World Economic Outlook, October 2019*. Fundo Monetário Internacional

Foresight (2013). The Future of Manufacturing: A new era of opportunity and challenge for the UK Project Report. *The Government Office for Science*, London.

Ghobakhloo, M. (2018). The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*.

Grotti, M. V. F. (2019). *Classificação e processo de implementação de fábrica de aprendizagem voltada para aspectos da Indústria 4.0: estudo de caso Fábrica do Futuro USP* (Dissertação de Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo

Guimarães, M. O. (2017). *Fábrica do Futuro POLI - Implementação de uma Fábrica de Ensino voltada para a Indústria 4.0* (Trabalho de Formatura). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Headquarters for Japan's Economic Revitalization. (2015). *New robot strategy, Japan's robot strategy, vision, strategy, action plan*.

Hecklau, F., Galeitzke, M., Flachs, S., & Kohl, H. (2016). Holistic approach for human resource management in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 54(1), 1-6.

Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for industrie 4.0 scenarios. In *49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)* (pp. 3928-3937). IEEE.

Hupfeld, A. (2018) *Factory Design of the Learning Factory “Fábrica do Futuro”*. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

IALF - International Association of Learning Factories. (2019a). Recuperado de <https://www.ialf-online.net/index.php/history.html>

IALF - International Association of Learning Factories. (2019b). Recuperado de https://www.ialf-online.net/index.php/projects/closed/14-projekte_abgeschlossen/40-das-dritte-abgeschlossene-projekt-bsp-2.html

Inova USP - Centro de Inovação da USP (2020). São Paulo, SP: Universidade de São Paulo. Recuperado de <https://inova.usp.br/>

Jerman, A., Pejić Bach, M., & Bertoncelj, A. (2018). A bibliometric and topic analysis on future competences at smart factories. *Machines*, 6(3), 41.

Jorgensen, J. E., Lamancusa, J. S., Zayas-Castro, J. L., & Ratner, J. (1995). The learning factory. In *Proceedings of the Fourth World Conference on Engineering Education*, St. Paul, Minneapolis, USA.

Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., & Wahlster, W. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group. *Forschungsunion*.

Kuo, T. C., & Wang, M. L. (2012). The optimisation of maintenance service levels to support the product service system. *International Journal of Production Research*, 50(23), 6691-6708.

Lamancusa, J. S., Zayas, J. L., Soyster, A. L., Morell, L., & Jorgensen, J. (2008). The learning factory: Industry-partnered active learning—A new approach to integrating design and manufacturing into engineering curricula. *Journal of Engineering Education*, 97(1), 5-11.

Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & information systems engineering*, 6(4), 239-242.

Leal, L. F., Fleury, A., & Zancul, E. (2020a). Starting up a Learning Factory focused on Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 45, 436-441.

Leal, L. F., de Oliveira, M. S., da Silveira, D. K. B., Santana, A. L. M., Junior, A. C. G., Reis, D. A., ... & Zancul, E. (2020b). Fábrica de Ensino em Indústria 4.0: Proposição de Modelo de Negócios. *Revista de Ensino de Engenharia*, 39, 157-169.

Lee, M., Yun, J., Pyka, A., Won, D., Kodama, F., Schiuma, G., ... & Yan, M. R. (2018). How to respond to the Fourth Industrial Revolution, or the Second Information Technology Revolution? Dynamic new combinations between technology, market, and society through open innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 4(3), 21.

Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. D. F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0-a systematic literature review and research agenda proposal. *International journal of production research*, 55(12), 3609-3629.

Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of industrial information integration*, 6, 1-10.

Marilungo, E., Papetti, A., Germani, M., & Peruzzini, M. (2017). From PSS to CPS design: a real industrial use case toward Industry 4.0. *Procedia Cirp*, 64, 357-362.

MDIC - Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (2018, 14 de março). Edital de Chamamento Público Nº 1/2018, de 14 de março de 2019. Chamada pública do Ministério da Indústria, Comércio exterior e Serviços para a criação de plataformas de experimentação, permitindo a realização de experimentos, teste de hipóteses e novas tecnologias em ambiente que simule a escala de produção em um cenário real. *Diário Oficial da União*. Recuperado de <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=14/03/2018&jornal=530&pagina=116&totalArquivos=262>.

MDIC - Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. (2019). Recuperado de <http://www.industria40.gov.br/>

Mialhe, N. & Hodes, C. (2017). Making the AI revolution work for everyone. *AI Initiative: The Future Society*.

Miguel, P. A. C. (Org.), Afonso Fleury, A., Mello, C. H. P., Nakano, D. N., de Lima, E. P., Turrioni, J. B., (...) & Pureza, V. (2012) *Metodologia de pesquisa para Engenharia de Produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO

MISE - Minister of Economic Development. (2019). Recuperado de <https://www.mise.gov.it/index.php/it/industria40>

Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., & Barbaray, R. (2018). The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 56(3), 1118-1136.

Monostori, L. (2014). Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. *Procedia Cirp*, 17, 9-13.

Morgado, M. R. (2019) *Projeto e desenvolvimento de sistema eletrônico embarcado para skate da Fábrica do Futuro POLI*. (Trabalho de Formatura) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Motyl, B., Baronio, G., Uberti, S., Speranza, D., & Filippi, S. (2017). How will change the future engineers' skills in the Industry 4.0 framework? A questionnaire survey. *Procedia Manufacturing*, 11, 1501-1509.

Nagy, J., Oláh, J., Erdei, E., Máté, D., & Popp, J. (2018). The role and impact of Industry 4.0 and the internet of things on the business strategy of the value chain—the case of Hungary. *Sustainability*, 10(10), 3491.

Olsen, T. L., & Tomlin, B. (2020). Industry 4.0: opportunities and challenges for operations management. *Manufacturing & Service Operations Management*, 22(1), 113-122.

Pallant, J. L., Sands, S., & Karpen, I. O. (2020). The 4Cs of mass customization in service industries: a customer lens. *Journal of Services Marketing*.

Porter, M. E., & Heppelmann, J. E. (2015). How smart, connected products are transforming companies. *Harvard business review*, 93(10), 96-114.

Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital Twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *Ieee Access*, 6, 3585-3593.

Ramirez-Mendoza, R. A., Morales-Menendez, R., Iqbal, H., & Parra-Saldivar, R. (2018). Engineering Education 4.0:—proposal for a new Curricula. In *2018 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)* (pp. 1273-1282). IEEE.

Rauch, E., Morandell, F., & Matt, D. T. (2019). AD Design Guidelines for Implementing I4. 0 Learning Factories. *Procedia Manufacturing*, 31, 239-244.

Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. *Boston Consulting Group*, 9(1), 54-89.

Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., ten Hompel, M., & Wahlster, W. (2017). Industrie 4.0 maturity index. *Managing the digital transformation of companies*. Munich: Herbert Utz

Schützer, K., Rodrigues, L. F., Bertazzi, J. A., Durão, L. F. C., & Zancul, E. (2017). Learning environment to support the product development process. *Procedia Manufacturing*, 9, 347-353.

Schwab, K. (2016). *A Quarta Revolução Industrial*. Edipro.

Sen, A. (2019) *Industry 4.0 and Computational Vision: an application-based case study at Fábrica do Futuro at USP*. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Stark, R., & Damerau, T. (2019). Digital Twin. In *CIRP Encyclopedia of Production Engineering* (pp. 1-8). Springer, Berlin, Heidelberg.

Suk-ye, J. (2015, 19 de Novembro). Innovation in Manufacturing 3.0 Strategy Needs Better Focus with Clearer Direction. *businesskorea.co.kr*. Recuperado de <http://www.businesskorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=13060>

Tisch, M., Hertle, C., Abele, E., Metternich, J., & Tenberg, R. (2016). Learning factory design: a competency-oriented approach integrating three design levels. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(12), 1355-1375.

Tisch, M., Ranz, F., Abele, E., Metternich, J., & Hummel, V. (2015). Learning factory morphology—study of form and structure of an innovative learning approach in the manufacturing domain. *The Turkish Online Journal of Educational Technology* (Special Issue 2 for International Conference on New Horizons in Education 2015), 356–363.

Tisch, M., & Metternich, J. (2017). Potentials and limits of learning factories in research, innovation transfer, education, and training. *Procedia Manufacturing*, 9, 89-96.

Voss, C., Tsikriktsis, N., Frohlich, M. (2002). Case research in operations management. *International Journal of Operations & Production Management*, 22(2), 195-219.

Wagner, U., AlGeddawy, T., ElMaraghy, H., & Müller, E. (2012). The state-of-the-art and prospects of learning factories. *Procedia CIRP*, 3, 109-114.

Wagner, U., AlGeddawy, T., ElMaraghy, H., & Müller, E. (2014). Product family design for changeable learning factories. *Procedia CIRP*, 17, 195-200.

- Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016). Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(1), 3159805
- Wang, Y., Ma, H. S., Yang, J. H., & Wang, K. S. (2017). Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production. *Advances in Manufacturing*, 5(4), 311-320.
- Wank, A., Adolph, S., Anokhin, O., Arndt, A., Anderl, R., & Metternich, J. (2016). Using a learning factory approach to transfer Industrie 4.0 approaches to small-and medium-sized enterprises. *Procedia CIRP*, 54, 89-94..
- Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941-2962.
- Yin, R. K. (2015). *Estudo de Caso-: Planejamento e métodos*. Bookman editora.
- Zancul, E. S., Takey, S. M., Barquet, A. P. B., Kuwabara, L. H., Miguel, P. A. C., Rozenfeld, H., ... & Del Giudice, M. (2016). Business process support for IoT based product-service systems (PSS). *Business Process Management Journal*. Vol. 22(2),
- Zancul, E., Martins, H. O., Lopes, F. P., & da Silva Neto, F. A. (2020). Machine Vision applications in a Learning Factory. *Procedia Manufacturing*, 45, 516-521.
- Zheng, P., Lin, T. J., Chen, C. H., & Xu, X. (2018). A systematic design approach for service innovation of smart product-service systems. *Journal of Cleaner Production*, 201, 657-667.
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. *Engineering*, 3(5), 616-630.