

JULIANA CAVALCANTE DA SILVA

FÁBRICA POLI: CONCEPÇÃO DE UMA FÁBRICA DE ENSINO NO CONTEXTO DA  
INDÚSTRIA 4.0

São Paulo

2015



JULIANA CAVALCANTE DA SILVA

FÁBRICA POLI: CONCEPÇÃO DE UMA FÁBRICA DE ENSINO NO CONTEXTO DA  
INDÚSTRIA 4.0

Trabalho de Formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do diploma  
de Engenharia de Produção

São Paulo

2015



JULIANA CAVALCANTE DA SILVA

FÁBRICA POLI: CONCEPÇÃO DE UMA FÁBRICA DE ENSINO NO CONTEXTO DA  
INDÚSTRIA 4.0

Trabalho de Formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do diploma  
de Engenharia de Produção

Orientador: Eduardo de Senzi Zancul

São Paulo  
2015



## FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Juliana Cavalcante

Fábrica POLI: Concepção de uma fábrica de ensino no contexto da  
Indústria 4.0 / J. C. Silva -- São Paulo, 2015.

121 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.  
Departamento de Engenharia de Produção.

1.Fábrica de Ensino 2.Indústria 4.0 3.Internet das Coisas 4.Cyber  
Physical Systems I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.  
Departamento de Engenharia de Produção II.t.



Dedico este trabalho a todos que dedicam  
suas vidas à melhoria do ensino no país.



## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, pelo apoio dado a todos os meus projetos acadêmicos e pessoais.

Ao meu parceiro, Leandro, pelo suporte, e pela alegria compartilhada mesmo nos momentos difíceis.

Aos meus amigos, pela compreensão nas ausências e comemoração nas conquistas.

Ao Luiz Durão pela coorientação ativa e por todos conselhos.

Ao Prof. Dr. Eduardo de Senzi Zancul, pela confiança depositada há 3 anos, que me guiou até esta etapa final da graduação, e pela orientação deste trabalho.



## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a concepção da Fábrica POLI, uma fábrica de ensino nos moldes da Indústria 4.0, a ser implantada na Escola Politécnica da USP. A concepção abrange tanto a definição dos conceitos estudados na fábrica quanto o mapeamento da infraestrutura necessária para desenvolvê-los. O trabalho contemplou a revisão bibliográfica sobre os temas Indústria 4.0 e fábricas de ensino, bem como levantamento de iniciativas a estes relacionadas. Com base na literatura e em outras experiências internacionais, foi possível traçar os principais requisitos da concepção Fábrica POLI e desenvolvê-la de modo adaptado às necessidades e restrições específicas da Escola Politécnica. Os resultados alcançados neste trabalho são essenciais para a continuidade do projeto da Fábrica POLI, sobretudo no direcionamento da fase de implantação e na obtenção de financiamento.

**Palavras-chave:** fábrica de ensino, Indústria 4.0, *Industrial Internet*, Internet das Coisas, *Cyber-Physical Systems*, customização em massa.



## ABSTRACT

This work aims to conceive the "Fábrica POLI", a learning factory along the lines of Industry 4.0, to be implemented at Polytechnic School of USP. The design covers both the definition of the concepts analyzed in the factory, as the mapping of the infrastructure needed to develop them. The work included a literature review on the subjects of Industry 4.0 and learning factories, as well as the collection of real-cases initiatives related to them. Based on the literature and other international experiences, it was possible to trace the major requirements for "Fábrica POLI" and to develop it according to the specific needs and constraints of the Polytechnic School. The results achieved with this work are essential to the progress of "Fábrica POLI" project, especially in the deployment phase and in obtaining financing.

**Keywords:** learning factory, Industry 4.0, Industrial Internet, Internet of Things, Cyber-Physical Systems, mass customization



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2-1 - As revoluções industriais ao longo do tempo.....	27
Figura 2-2 - Arquitetura-padrão de um produto inteligente .....	36
Figura 2-3 - Estrutura de uma fábrica inteligente.....	37
Figura 2-4 - Tipos de modularidade .....	40
Figura 2-5 - Mapa estratégico de gestão da variabilidade.....	41
Figura 2-6 - Etapas do guia curricular para fábrica de ensino.....	44
Figura 3-1 - Resumo do método de trabalho .....	47
Figura 4-1 - Fluxo produtivo da iFactory .....	51
Figura 4-2 - Visão geral da infraestrutura da Fábrica de Ensino CiP.....	53
Figura 4-3 - Visão geral da LEP.....	55
Figura 4-4 - Visão geral da LSP .....	56
Figura 4-5 - Visão geral da infraestrutura da Fábrica de Ensino aIE.....	57
Figura 4-6 - Produto-exemplo da aIE: conjunto para mesa.....	58
Figura 4-7 - Leiaute da planta da fábrica de ensino da EAFIT .....	58
Figura 4-8 - Jogo de xadrez modular.....	59
Figura 4-9 - Sala de Projetos do InovaLab@POLI .....	63
Figura 5-1 - Diagrama de Venn dos temas passíveis de estudo .....	75
Figura 5-2 - Partes de uma bicicleta .....	76
Figura 5-3 - Pedal de bicicleta.....	78
Figura 5-4 - " <i>Lady pedals</i> " e " <i>Connect pedal</i> " .....	79
Figura 5-5 - Centro de usinagem DT-MN001 – EMCO Concept Mill 55 .....	87
Figura 5-6 - Torno DT-MN002 – EMCO Concept Turn 60 .....	88
Figura 5-7 - Máquina de solda MIGFACIL145-220V .....	89
Figura 5-8 - Estrutura de funcionamento de um sistema RFID.....	91
Figura 6-1 - Sistema de procedimentos SLP .....	106
Figura 6-2 - Carta multi-processos para fluxos-exemplo .....	108
Figura 6-3 - Diagrama de interligações preferenciais, .....	108
Figura 6-4 - Proposição de leiaute simplificado da Fábrica POLI .....	111



## LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 - Quadro-resumo das fábricas de ensino estudadas.....	60
Tabela 5-1 - Disciplinas integráveis à Fábrica POLI .....	69
Tabela 5-2 - Avaliação qualitativa dos componentes da bicicleta.....	77
Tabela 5-3 - Avaliação quantitativa dos componentes da bicicleta.....	77
Tabela 5-4 - Escala de importância relativa de Saaty (1980).....	80
Tabela 5-5 - Exemplo de cálculo do vetor de Eigen.....	81
Tabela 5-6 - Exemplo de cálculo de avaliação de alternativas.....	81
Tabela 5-7 - Quadro-resumo das impressoras 3D para design.....	82
Tabela 5-8 - Cálculo do vetor de Eigen para as impressoras 3D para design .....	83
Tabela 5-9 - Cálculo dos pesos para as impressoras 3D para design .....	83
Tabela 5-10 - Resultado da seleção multicritério da impressora 3D para design .....	84
Tabela 5-11 - Quadro-resumo das impressoras 3D para fabricação.....	84
Tabela 5-12 - Cálculo do vetor de Eigen para as impressoras 3D para fabricação .....	85
Tabela 5-13 - Cálculo dos pesos das impressoras 3D para fabricação .....	86
Tabela 5-14 - Resultado da seleção multicritério da impressora 3D para fabricação .....	86
Tabela 5-15 - Detalhamento dos kits de Arduino.....	90
Tabela 5-16 - Quadro-resumo dos componentes essenciais para RFID.....	91
Tabela 5-17 - Quadro-resumo dos computadores avaliados .....	92
Tabela 5-18 - Quadro-resumo das lousas interativas avaliadas.....	93
Tabela 5-19 - Quadro-resumo dos equipamentos de suporte avaliados .....	94
Tabela 5-20 - Justificativa da escolha dos equipamentos de suporte .....	95
Tabela 5-21 - Quadro-resumo dos <i>softwares</i> de modelagem 3D avaliados .....	96
Tabela 5-22 - Materiais de alimentação das impressoras selecionadas.....	98
Tabela 6-1 - Levantamento do número médio de alunos por GA .....	101
Tabela 6-2 - Perfil dos monitores requisitados.....	102
Tabela 6-3 - Definição das quantidades de equipamentos de design e fabricação.....	103
Tabela 6-4 - Definição da quantidade de equipamentos de suporte .....	104
Tabela 6-5 - Definição da quantidade dos acessórios e consumíveis.....	105
Tabela 6-6 - Levantamento da área ocupada pelos postos de trabalho .....	109



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
1.1	Contextualização do trabalho	21
1.2	Motivações	22
1.3	Objetivos	23
1.4	Papel da autora	23
1.5	Estrutura do trabalho	24
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>27</b>
2.1	Indústria 4.0	27
2.1.1	Motivadores	28
2.1.2	Desenvolvimento e características	28
2.1.3	Tecnologias viabilizadoras	31
2.1.4	Tecnologias aplicadas	35
2.1.5	Empresas engajadas	41
2.2	Estudos sobre fábricas de ensino	42
2.2.1	Guia curricular para fábrica de ensino	43
2.2.2	Fábricas de ensino holísticas	44
2.2.3	Desenvolvimento de produtos para fábricas adaptáveis	45
2.3	Síntese da Revisão Bibliográfica	46
<b>3</b>	<b>MÉTODO DE TRABALHO</b>	<b>47</b>
3.1	Levantamento das iniciativas	47
3.2	Definição do escopo da Fábrica POLI	48
3.3	Definição da infraestrutura da Fábrica POLI	48
<b>4</b>	<b>LEVANTAMENTO DAS INICIATIVAS</b>	<b>49</b>
4.1	Fábricas de ensino	49
4.1.1	Principais realizações	49
4.1.2	Desafios atuais das fábricas de ensino	61
4.2	Ensino prático na Escola Politécnica da USP	62
4.2.1	Iniciativas selecionadas	62
4.2.2	Oportunidades de desenvolvimento	65

<b>5</b>	<b>DEFINIÇÃO DO ESCOPO DA FÁBRICA POLI.....</b>	<b>67</b>
<b>5.1</b>	<b>Definição das competências a serem desenvolvidas .....</b>	<b>67</b>
5.1.1	Competências ligadas à Indústria 4.0.....	67
5.1.2	Competências ligadas às boas práticas em fábricas de ensino.....	68
5.1.3	Competências ligadas às oportunidades de desenvolvimento na Poli .....	68
<b>5.2</b>	<b>Definição do foco e do produto-exemplo.....</b>	<b>70</b>
5.2.1	O ambiente da fábrica .....	70
5.2.2	O produto-exemplo e suas oportunidades .....	71
5.2.3	Componente a ser fabricado.....	75
<b>5.3</b>	<b>Definição de equipamentos.....</b>	<b>79</b>
5.3.1	Equipamentos para design e fabricação .....	81
5.3.2	Equipamentos eletrônicos .....	89
5.3.3	Equipamentos de suporte .....	92
5.3.4	Acessórios e consumíveis .....	96
<b>6</b>	<b>INFRAESTRUTURA DA FÁBRICA POLI .....</b>	<b>99</b>
<b>6.1</b>	<b>Capacidade da fábrica .....</b>	<b>99</b>
6.1.1	Pessoal e usuários.....	99
6.1.2	Equipamentos, acessórios e consumíveis.....	102
<b>6.2</b>	<b>Configuração da fábrica .....</b>	<b>105</b>
6.2.1	Dados de entrada.....	107
6.2.2	Inter-relações de atividades.....	107
6.2.3	Espaço necessário .....	108
6.2.4	Limitações práticas .....	110
6.2.5	Leiaute proposto.....	111
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS .....</b>	<b>113</b>
<b>7.1</b>	<b>Resultados quantitativos e qualitativos.....</b>	<b>113</b>
<b>7.2</b>	<b>Próximos passos.....</b>	<b>113</b>
<b>7.3</b>	<b>Conclusões pessoais.....</b>	<b>114</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>115</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização do trabalho

Este trabalho contempla a concepção da Fábrica POLI, uma unidade de ensino e pesquisa integrada à Escola Politécnica, de caráter prático e multidisciplinar, com foco em fabricação e novas tecnologias. Esta iniciativa tem como pilares duas tendências recentes ligadas ao ensino da engenharia e ao novo contexto industrial: as fábricas de ensino e a Indústria 4.0.

As fábricas de ensino têm sido criadas para desenvolver conhecimentos substanciais sobre melhoria de processos e de métodos a alunos e participantes da indústria, em um ambiente real de manufatura (KREIMEIER et al., 2014).

Lamancusa *et al.* (2001) explica que os objetivos da introdução dos conceitos de fábrica no ambiente acadêmico são o oferecimento de uma formação prática de engenharia, com equilíbrio entre os conhecimentos teóricos e de manufatura, assim como de experiências diretas no design dos sistemas de produção e na realização do produto.

Com estes objetivos, as iniciativas de fábricas de ensino vão ao encontro dos novos requisitos da indústria que, segundo Tisch *et al.* (2013), demanda das empresas a capacidade de adaptação e resposta rápida aos desafios atuais do mercado, como redução do ciclo de vida dos produtos e produção customizada.

Neste novo contexto industrial, destaca-se o movimento da Indústria 4.0 que, segundo publicação da *German Trade and Invest* (2014), com suporte de novas tecnologias de informação, de comunicação e de produção, e conceitos-chave como a Internet das Coisas e os *Cyber-Physical Systems*, propõe, a conexão de sistemas embarcados de tecnologias de produção e produção inteligente para consolidar a nova era tecnológica, que vai transformar as cadeias de valores e os modelos de negócios da indústria.

Utilizando conceitos modernos como Indústria 4.0 e *Industrial Internet*, a Fábrica POLI deve propor um produto exemplo e recursos virtuais e reais que podem ser compartilhados por diferentes disciplinas da graduação.

## 1.2 Motivações

Após um período de intenso crescimento, diversificação e consolidação da estrutura industrial brasileira entre 1950 e 1985, observa-se, segundo o Departamento de Estudos Econômicos (2010), desde 1986 uma expressiva perda de participação da indústria na produção agregada do país, configurando um processo de desindustrialização.

Enquanto nos países desenvolvidos, apontam Rowthorn e Ramaswamy (1999), o processo de desindustrialização foi resultado do crescimento da produtividade da indústria, que transferiu trabalhadores para os outros setores da economia, no Brasil, segundo Cano (2012), este processo se associa à perda de competitividade das exportações e aumento das importações.

Agostini (2015) associa essa perda de competitividade à menor demanda global, com o desaquecimento do mercado, e o acirramento da competição em mercados anteriormente estratégicos, como a Argentina e a Europa.

Com a mudança do cenário da indústria mundial, através da Indústria 4.0, os atrasos tecnológicos do Brasil devem ficar mais evidentes, levando a uma perda de competitividade ainda maior.

No 33º Encontro Econômico Brasil-Alemanha (2015), promovido pela FIESC e pela CNI, a defesa do setor produtivo para a retomada do crescimento econômico foi um dos assuntos principais, ao lado dos fortes incentivos às parcerias entre o país e a Alemanha.

Possuindo uma das mais competitivas indústrias de manufatura e a liderança mundial no setor de equipamentos de produção, a Alemanha demonstra a importância de todos os aspectos da indústria para o país. Segundo a *VDE Association for Electrical, Electronic & Information Technologies* (2014), o projeto da Indústria 4.0 foi apresentado pelo Governo Federal da Alemanha, com o objetivo de refletir essa importância da tecnologia de manufatura e o setor de ICT que o apoia.

Devido às rápidas mudanças em produtos e sistemas de produção, os estudantes precisam ser introduzidos muito mais rapidamente aos métodos existentes e futuros [...]. Através de uma "fábrica de ensino", fábricas reais podem ser trazidas para a sala de aula (MATT, RAUCH, DALLASEGA, 2014).

Segundo Wagner *et al.* (2012), um grande número de instituições pelo mundo já

estabeleceu estruturas de ensino prático de manufatura em seus laboratórios, visando desenvolver e demonstrar os conceitos da nova realidade industrial e formar os estudantes de engenharia em seu potencial prático.

Nesse contexto, a Escola Politécnica, ao propor a criação da Fábrica POLI, visa manter sua postura de alinhamento às novas práticas educacionais e, sobretudo, difundir os conceitos da Indústria 4.0 à indústria nacional, contribuindo para a recuperação do potencial industrial do país e de sua competitividade internacional.

### **1.3 Objetivos**

Os objetivos principais deste projeto são: conceber e detalhar os elementos da Fábrica POLI, que inclui a definição das competências a serem desenvolvidas nos diferentes ramos da engenharia e a escolha de um produto-exemplo; e planejar a implantação da infraestrutura física desta fábrica de ensino na Escola Politécnica da USP.

### **1.4 Papel da autora**

A relação da autora deste trabalho de formatura com temas relacionados à pesquisa e inovação na Escola Politécnica data de 2012, quando esta passou a integrar o grupo de pesquisa do professor Eduardo de Senzi Zancul, no período de criação do InovaLab@Poli no Departamento da Engenharia de Produção.

Nesse mesmo período, a autora desenvolveu um projeto de Iniciação Científica, como bolsista da FAPESP, na área de Prototipagem Rápida por adição de materiais, também chamada de impressão 3D ou manufatura aditiva, que é um dos temas de estudo principais do grupo de pesquisa. Este projeto resultou no artigo "*Additive manufacturing process selection criteria based on parts' selection*", publicado pelo *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2015).

Os resultados positivos deste projeto e o interesse natural por tecnologia e inovação mantiveram a autora conectada aos temas de estudo do InovaLab@Poli, cada vez mais abrangentes, mesmo durante seu estágio de Duplo Diploma na Arts et Métiers ParisTech, entre agosto de 2013 e julho de 2015.

Com o advento do conceito de Indústria 4.0 e as iniciativas de integração da indústria com o ensino de engenharia pelo mundo, um grupo de professores da Escola Politécnica, dentre os quais vários professores do Departamento de Engenharia de Produção, identificou na Escola Politécnica uma lacuna para a criação de uma fábrica de ensino, a Fábrica POLI. O grupo chegou a elaborar uma proposta preliminar de projeto visando a implantação da Fábrica, mas o projeto ainda carecia de detalhamentos.

Devido à sua identificação com o tema, a autora iniciou sua colaboração no projeto por meio deste trabalho de formatura, que corresponde à concepção da Fábrica POLI, visando a sua implantação futura.

Este trabalho segue, nesse sentido, a mesma lógica do TF intitulado "Determinação de requisitos para a implantação de um laboratório de produtos no Departamento de Engenharia de Produção", de Renato Fernandes de Araújo (2010), que definiu a visão e detalhou os elementos que permitiram, posteriormente, a obtenção de financiamento e a implantação da Sala de Projetos e da Oficina Mecânica no Departamento de Engenharia de Produção. Após a conclusão deste TF em 2010, o projeto obteve financiamento em edital de 2011 e começou a ser implantado em 2012. Espera-se, com este trabalho, trajetória semelhante.

## **1.5 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está dividido em 7 grandes tópicos, entre os quais, o capítulo introdutório já apresentado.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica dos temas atuais que mais influenciam esta iniciativa de criação de uma fábrica de ensino na Escola Politécnica, ou seja, a Indústria 4.0 e as fábricas de ensino.

Na introdução à Indústria 4.0 são apresentadas suas motivações, seu desenvolvimento e características particulares e as principais realizações tecnológicas. Para as fábricas de ensino são apresentados estudos teóricos relevantes para delineamento destas iniciativas.

No terceiro capítulo, a metodologia de trabalho é detalhada, definindo a sequência lógica para o desenvolvimento do projeto.

O capítulo 4 apresenta o levantamento de informações conceituais e estruturais das principais fábricas de ensino existentes e das infraestruturas na Escola Politécnica da USP que perpetuam o ensino prático. Com base nestas iniciativas, serão apontados os principais desafios, deficiências e oportunidades de melhoria aplicáveis à Fábrica POLI.

O quinto capítulo, o primeiro do desenvolvimento do trabalho, identifica o escopo da Fábrica POLI, com a definição das competências a serem desenvolvidas, do enfoque e do produto exemplo da fábrica de ensino, e dos equipamentos necessários para sua implantação.

No capítulo 6, com base no escopo definido no capítulo precedente, é detalhada a infraestrutura da Fábrica POLI, com a definição da capacidade da fábrica e da sua configuração física.

Finalmente, no último capítulo são apresentadas as conclusões finais deste projeto e diretrizes para as próximas fases da criação da Fábrica POLI.



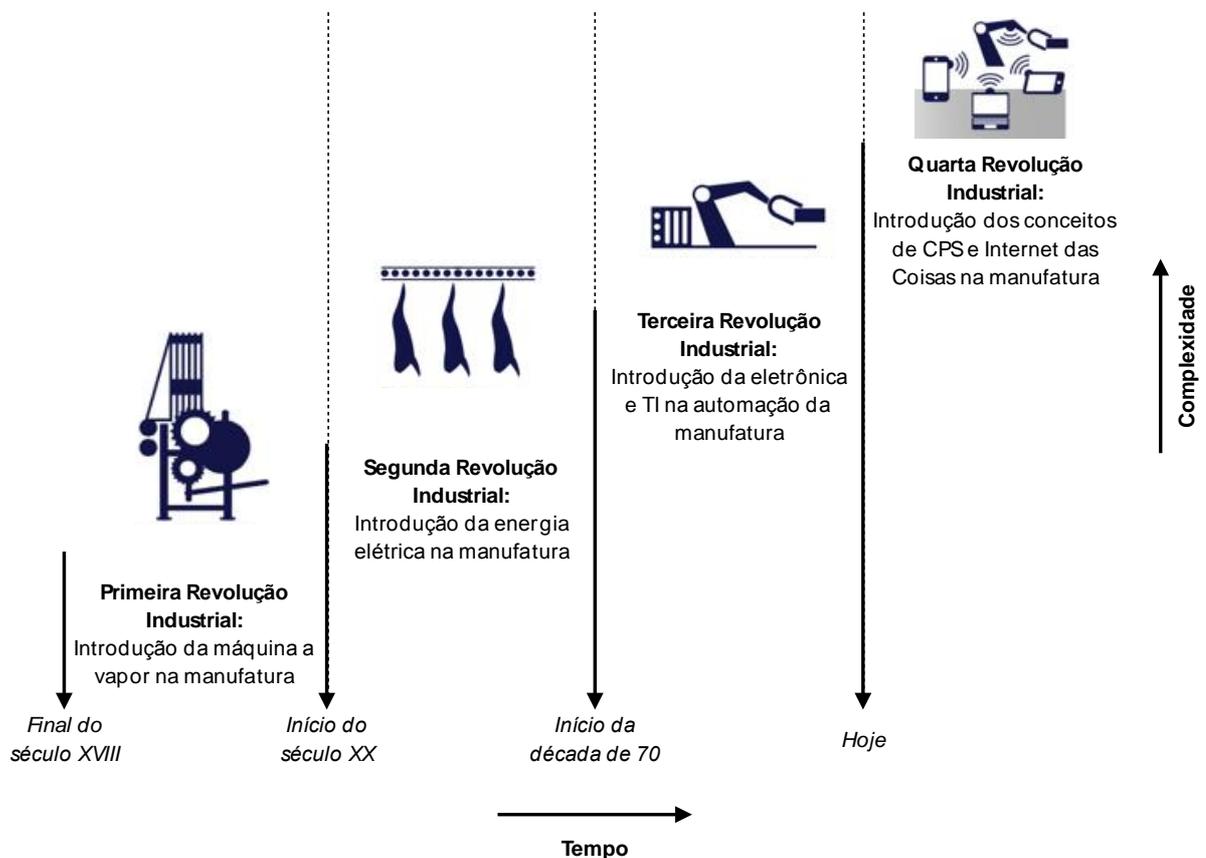
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nessa seção serão descritos os conceitos necessários para delinear o escopo do projeto de criação de uma fábrica de ensino na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, abordando o contexto atual da indústria e os estudos realizados sobre fábricas de ensino.

### 2.1 Indústria 4.0

As três primeiras revoluções industriais foram resultado da mecanização, eletricidade e tecnologia de informação. Agora, a introdução da Internet das Coisas e Serviços no contexto da manufatura está lançando uma quarta revolução industrial (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

Figura 2-1 - As revoluções industriais ao longo do tempo



Fonte: Adaptado de Kagermann, Wahlster e Helbig (2013)

### 2.1.1 Motivadores

A quarta revolução industrial iminente, identificada inicialmente na Alemanha como Indústria 4.0, surgiu como resposta daquele país à competitividade global crescente pela qualidade de produtos e baixos custos de produção.

Segundo Brettel *et al.* (2014), empresas de manufatura da Alemanha reconheceram que os consumidores não estavam dispostos a pagar preços mais altos por melhorias incrementais de qualidade, e passaram a ajustar à produção focando em produtos customizados e respostas rápidas ao mercado.

Visando estratégias de produção como manufatura ágil e customização em massa, as empresas de manufatura, apontam Brettel *et al.* (2014), transformaram-se em redes integradas, unificando competências e promovendo o compartilhamento de informações em tempo real a todos os elos da cadeia produtiva.

A inclusão de *Cyber-Physical Systems* e o aumento da utilização das tecnologias de informação e comunicação permite que a engenharia digital de produtos e de produção sejam processadas de forma equivalente, reforça Brettel *et al.* (2014).

### 2.1.2 Desenvolvimento e características

Segundo Blanchet *et al.* (2014), após três revoluções industriais que trouxeram importantes rupturas no processo industrial e resultaram em aumento significativo da produtividade, a iniciativa Indústria 4.0 é um produto da quarta revolução industrial. Os autores enfatizam a ideia de uma digitalização consistente e interligação de todas as unidades produtivas na Indústria 4.0, que deve ser distinguida dos conceitos mais específicos como Internet das coisas e *Cyber-Physical Systems*.

Segundo Kagermann, Lukas, e Wahlster (2011 *apud* HERMANN, PENTEK e OTTO, 2015), o termo "Indústria 4.0" tornou-se conhecido em 2011, quando uma iniciativa que carregava esse nome, fomentada por representantes de negócios, política e acadêmicos, abordou novas ideias para fortalecer a competitividade da indústria de manufatura alemã.

Embora o termo "Indústria 4.0" tenha surgido e se difundido predominantemente na Alemanha, os seus princípios já alcançaram outros países sob outros nomes. A General Electric, nos Estados Unidos, segundo Fitzgerald (2013), nomeou como "*Industrial Internet*" a

integração de maquinário complexo a redes de sensores e *softwares*, usados para prever, controlar e planejar a produção.

#### 2.1.2.1 Agentes facilitadores da Indústria 4.0

Schuh *et al.* (2015) apontam quatro facilitadores da Indústria 4.0, responsáveis pelo aumento da produtividade neste contexto: a globalização da tecnologia de informação, a existência de uma fonte unificada de dados consistentes, a automatização e a cooperação.

A globalização da tecnologia de informação, que engloba principalmente a capacidade de acessar dados massivos, de qualquer parte do mundo, de uma nuvem central, é um resultado do aumento constante da velocidade dos computadores e do aumento da capacidade de processamento. Esses aumentos são também agentes facilitadores de simulações mais eficientes e de processamentos de dados exaustivos das empresas.

Também ligada à globalização da tecnologia de informação, a existência de uma fonte única de dados gera informações consistentes, que são armazenadas no ciclo de vida do produto, possibilitando mudanças visíveis e evitando ambiguidades no produto e nos processos.

O terceiro facilitador da Indústria 4.0, a automação, está diretamente ligado às tecnologias facilitadoras, apresentadas a seguir, no item 2.1.3. As tecnologias inovadoras de automação, como os *Cyber-Physical Systems*, tornam possível a manufatura de produtos em operações sem pausa, aumentando a produtividade. Ao lado disso, encontra-se a necessidade de desenvolvimento de sistemas de produção flexíveis para atender a demanda por produtos variados e com ciclos de vida curtos.

A cooperação, identificada como o quarto principal facilitador, estende-se à todos os países, todos os tipos de tecnologia e todas as atividades. Esta pode ser estabelecida pelo cultivo de uma rede de comunicação, que, ao mesmo tempo, estimula a troca de experiência dos funcionários e aprova a utilização de aparelhos inteligentes de uso pessoal no trabalho, e pela descentralização das responsabilidades dos tomadores de decisão do sistema.

### 2.1.2.2 Elementos característicos da Indústria 4.0

A Indústria 4.0, para Schuh *et al.* (2014), enfatiza a ideia de digitalização consistente e conexão de todas as unidades produtivas, através de algumas características-chave, como *Cyber-Physical Systems*, robôs e máquinas inteligentes, *Big Data* e melhor qualidade de conexão, eficiência e descentralização energética, industrialização virtual e fábrica 4.0.

O manual publicado pela *VDE Association for Electrical, Electronic & Information Technologies* (2014) aponta que, no contexto da Indústria 4.0, os *Cyber-Physical Systems*, apresentados em detalhe no item 2.1.3.2, serão muito mais conectados a todos os subsistemas, processos, objetos internos e externos, redes de fornecedores e de clientes. A complexidade dos sistemas também é maior e exige ofertas de mercado mais sofisticadas.

O número de robôs que substituíram a mão de obra humana na última revolução industrial, segundo Blanchet *et al.* (2014), quase dobrou de número na Europa, desde 2004, e estão cada vez mais inteligentes e adaptáveis. Na Indústria 4.0, homens e máquinas trabalham juntos, conectados por interfaces inteligentes que permitem, por exemplo, que o funcionário receba um alerta no seu telefone celular quando um problema ocorre e dê instruções para que a produção continue até que ele volte a fábrica no dia seguinte.

Identificado como a matéria-prima do século 21 por Blanchet *et al.* (2014), o termo "*Big Data*" engloba todas as informações que precisam ser salvas, processadas e analisadas. Sabendo que é esperado que esta quantidade de dados duplique a cada 1,2 ano, os meios de manipulá-los têm mudado com o uso de computação em nuvem e outros métodos, todos dependentes de uma melhor qualidade de conexão.

A energia na Indústria 4.0 segue a tendência de descentralização nas plantas, impulsionando a necessidade do uso de tecnologias limpas locais, o que se torna também mais atrativo financeiramente para as empresas.

Além das características já citadas, que tratam de elementos estruturais da produção no contexto da Indústria 4.0, outro elemento característico desta nova fase é a industrialização virtual. Ela permite o uso de plantas e produtos virtuais para simulação e preparação da produção física, reduzindo o tempo e esforço anteriormente gastos com adaptações e testes anteriores ao lançamento de novas plantas ou novos produtos em plantas já existentes.

Todos os elementos citados anteriormente são encontrados em estruturas identificadas como Fábricas 4.0 ou Fábricas inteligentes, que serão detalhadas no tópico 2.1.4.2.

### *2.1.2.3 Mudanças percebidas nas empresas*

A Indústria 4.0 pode ser tanto uma ameaça quanto uma oportunidade para as indústrias. Empresas de manufatura tradicionais certamente se depararão com novas funcionalidades e novos modelos de negócios industriais, que mudarão as regras de produtividade e concorrência neste meio. Segundo Blanchet *et al.* (2014), a implicação na iniciativa da Indústria 4.0 ocorrerá sob taxas diferentes em diferentes indústrias, mas as mudanças, apresentadas nos parágrafos seguintes, serão equivalentes.

No que se refere aos produtos, a Indústria 4.0 traz mais flexibilidade ao processo de produção, o que resulta, portanto, em produtos criados sob-medida para o cliente, com um custo relativamente baixo.

Na Indústria 4.0, os negócios devem operar de forma dispersa, retirando as barreiras entre informações e estruturas físicas, o que caracteriza o fenômeno chamado por Blanchet *et al.* (2014) de "democracia industrial". Esta nova abordagem favorece o desenvolvimento e entrada no mercado de empresas pequenas e mais especializadas.

Essa dispersão dos negócios implica também em uma reestruturação dos métodos e papéis dos profissionais, cujas funções estão cada vez mais interligadas. Visando isto, o pensamento interdisciplinar é essencial, tanto na área técnica quanto na área social, inserindo nas empresas um processo contínuo de aprendizagem, colaboração e competências cruzadas.

## **2.1.3 Tecnologias viabilizadoras**

### *2.1.3.1 Internet das Coisas*

O termo Internet das Coisas (*Internet-of-Things* - IoT) refere-se (i) à rede global que conecta objetos através de tecnologias de internet, (ii) ao conjunto de tecnologias necessárias para criar essa interface (incluindo, por exemplo, RFIDs, sensores e atuadores, máquina à máquina, aparelhos de comunicação etc.) e (iii) ao conjunto de aplicações e serviços que

permitem que essas tecnologias abram novos negócios e oportunidades de mercado (MIORANDI *et al.*, 2012).

Segundo Gubbi *et al.* (2013), a aplicação da Internet das Coisas demanda três componentes principais: *hardware*, composto por sensores, atuadores e comunicadores; *middleware*, caracterizado por ferramentas de armazenagem e análise de dados; e apresentação, que configura ferramentas de fácil visualização e interpretação acessíveis de diferentes plataformas.

Adotando uma abordagem em camadas de funcionalidade, e mais detalhada que a de Gubbi *et al.* (2013), Bandyopadhyay e Sen (2011) dividem os componentes da Internet das Coisas em tecnologias-chave: tecnologias de identificação, de arquitetura, de comunicação, de rede, de processamento de dados e sinais, de ferramenta de pesquisa, de gestão de rede, de armazenagem de potência e energia, de segurança e privacidade e de standardização.

Para Atzori, Iera e Morabito (2010), a principal tecnologia utilizada em Internet das Coisas é o sistema RFID. Segundo Duroc e Kaddour (2012), a comunicação ocorre através de uma etiqueta com chip RFID chamada Tag RFID, que envia sinais a um leitor específico. A partir disso, um *software* é responsável pela conversão dos dados em informações significativas.

As etiquetas RFID, apontam Nassar, Luiz e Vieira (2014), podem funcionar de modo ativo ou passivo. As etiquetas de funcionamento ativo são maiores e possuem uma fonte de alimentação através de uma bateria, sendo capazes de enviar dados a um leitor por conta própria. As de funcionamento passivo não possuem bateria e a corrente é fornecida pelo leitor, possuindo um alcance de leitura menor em relação a uma tag ativa.

Redes de sensores são também cruciais para a Internet das Coisas. Na verdade, elas podem cooperar com sistemas RFID para rastrear melhor o status das coisas, isto é, sua localização, temperatura, movimentos etc (...). Redes de sensores são constituídas por um certo número de nódulos sensores em comunicação com uma rede sem fio. Usualmente os nódulos reportam os resultados de sua percepção para nódulos especiais chamados *sinks* (ATZORI, IERA, MORABITO, 2010).

Outra tecnologia essencial para a Internet das Coisas, segundo Lee e Lee (2015) é a computação em nuvem, o modelo de acesso compartilhado a recursos configuráveis (computadores, redes, servidores, aplicativos, serviços, *softwares*) que podem ser

classificados como Infraestrutura como um Serviço (IaaS) ou *Software* como um Serviço (SaaS). Computação em nuvem é uma solução para lidar com o processamento de dados simultâneo para dispositivos de Internet das Coisas e usuários em tempo real.

As principais aplicações da Internet das Coisas, apontadas por Atzori, Iera e Morabito (2010), são os ramos de transporte e logística, saúde, espaços inteligentes e social. Quanto aos desafios enfrentados pela Internet das Coisas nessas aplicações, Zorzi e al (2010) apontam a heterogeneidade, que atenda os requisitos de diversos tipos de dispositivos e tecnologias; a conectividade, que forneça capacidades de comunicação entre diferentes dispositivos; a privacidade e segurança; a capacidade de auto-execução, sem necessidade de interferência externa; e a gestão de energia.

#### 2.1.3.2 *Cyber-physical systems*

Segundo Lee (2015), o termo "*Cyber-Physical systems*" surgiu por volta de 2006, quando foi apresentado por Helen Gill na Fundação Nacional da Ciência nos Estados Unidos.

*Cyber-Physical System* (CPS) é uma promissora classe de sistemas que incorporam capacidades cibernéticas ao mundo físico, seja em homens, em infraestrutura ou plataformas, para transformar interações com este. Avanços no mundo cibernético em comunicações, redes, sensores, computadores, armazenagem e controle, assim como no mundo físico em materiais, hardware, combustíveis renováveis, são rapidamente convertidos para realizar essa classe de sistemas computacionais altamente colaborativos, que se apoiam em sensores e atuadores para monitorar e efetuar mudanças (POOVENDRAN, 2010, tradução nossa).

Para Poovendran (2010), a principal diferença entre os CPS e sistemas normais de controle é o uso de comunicadores que agregam não só configurabilidade e escalabilidade, mas também complexidade e estabilidade ao sistema. Além disso, CPS possuem sensores e atuadores mais eficientes e menos limitações de performance.

Existem diferentes maneiras de classificar a arquitetura dos *cyber-physical systems* e seus principais componentes. Aquela adotada por Dillon *et al.* (2010) divide os avanços e tecnologias dos CPS em três aspectos: protocolo de informações de rede, ambiente *middleware* e as ferramentas de análise.

O protocolo de informações é a camada na qual os dados são transmitidos à rede para obter informações, decisões e respostas às mudanças físicas em tempo real. O segundo aspecto, o ambiente *middleware*, corresponde à parte da infraestrutura onde os programadores de CPS interagem e controlam o ambiente físico com representações lógicas. A terceira e última camada apresentada por Dillon *et al.* (2010) são as ferramentas de análise, usadas para atender requisitos de qualidade de serviço, incluindo geralmente duas partes: a customização e otimização dos requisitos de qualidade de serviço, e o reforço dos requisitos de qualidade de serviço em um ambiente de recursos limitados.

Kyoung-Dae Kim e Kumar (2012) destacam as aplicações dos *cyber-physical systems* em energia, transporte e saúde. Na área de energia, as principais aplicações dos CPS estão no desenvolvimento de infraestruturas para sistemas de energia elétrica que ajudam a produzir, distribuir e utilizar a energia de forma mais limpa, eficiente e com custos mais baixos, através da integração da computação, comunicação e tecnologias de controle.

O destaque na área dos transportes é voltado ao desenvolvimento de veículos inteligentes, equipados com sistemas de computação e redes sem fio que permitem a troca de informações entre veículos e entre veículo e infraestrutura, que permitem, entre outras funções: condução automática através de monitoramento e estimativa de condições de trânsito; controle de estabilidade e de velocidade; e travas.

O principal objetivo do desenvolvimento de dispositivo médico equipado com CPS é melhorar sua eficiência, confiabilidade, inteligência e interoperabilidade. A integração de redes sem fio e de infraestrutura de sensores e computação nestes dispositivos permite o desenvolvimento de sistemas nos quais as condições fisiológicas do paciente podem ser diagnosticadas e tratadas de forma mais integrada e eficiente.

Para Derler, Lee e Vincentelli (2012), os maiores desafios encontrados na modelização de CPS são: integrar variáveis contínuas, utilizadas nos modelos dos processos físicos, em modelos discretos; manter os dados do modelo consistentes, principalmente em modelos complexos e realísticos; prevenir problemas de conexão entre os componentes do modelo, que podem estar nas unidades de medida, na semântica dos dados ou na transposição; modelar interações de funcionalidade e implementação; modelar comportamentos distribuídos; e gerenciar a heterogeneidade do sistema.

Outro aspecto bastante discutido é a segurança dos CPS em suas diferentes camadas. Segundo Kim e Kumar (2012), muito esforço tem sido investido na segurança das camadas computacionais e de comunicação, mas os sistemas têm dificuldades adicionais sabendo que eles envolvem não só essas duas camadas, mas também o controle e o próprio sistema físico.

Lee (2015) aponta que o CPS se relaciona fortemente aos termos populares como Internet das Coisas, Indústria 4.0 e Industrial Internet, pois todos refletem a visão da tecnologia como conector do mundo físico com o mundo de informação.

#### **2.1.4 Tecnologias aplicadas**

##### *2.1.4.1 Produto inteligente*

Produtos inteligentes (*smart products*) são objetos, dispositivos ou *softwares* enriquecidos com informações sobre eles mesmos, outros dispositivos, e seus componentes. Estas informações são divididas em camadas de acordo com o nível de detalhe ao qual ele se orienta: capacidades dos dispositivos, funcionalidades, integridade, serviços aos usuários, e conectividade (AITENBICHLER et al, 2007, tradução nossa).

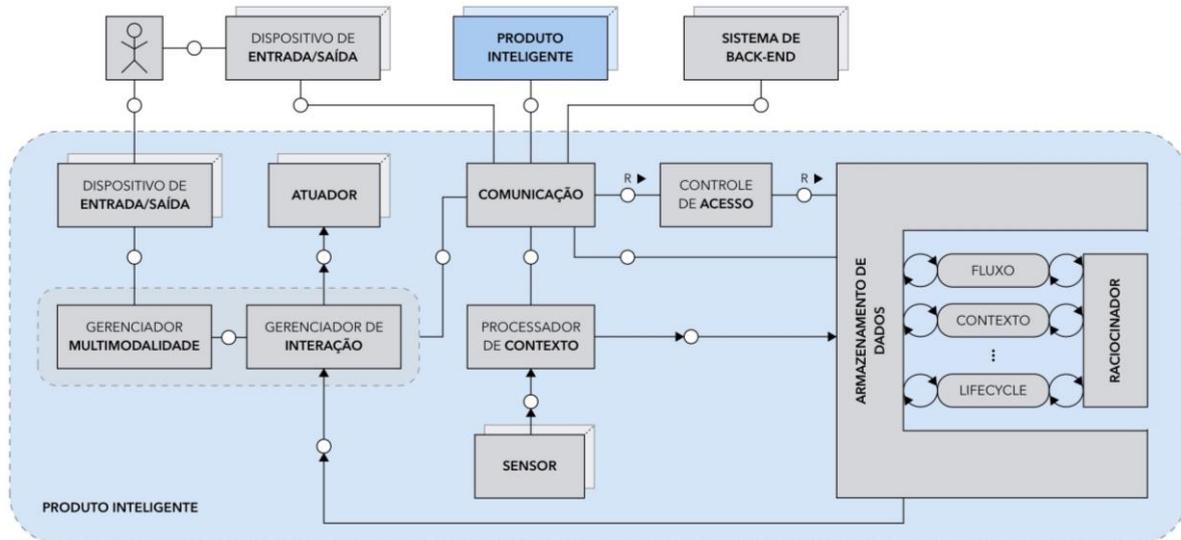
Segundo Rijdsdijk e Hultink (2009), os produtos inteligentes apresentam pelo menos uma das capacidades como autonomia, adaptabilidade, reatividade, multifuncionalidade, capacidade de cooperação, interação quasi-humana e personalidade, que só são encontradas em produtos comuns de forma limitada e sem ligação com tecnologias de informação.

Quanto às capacidades sugeridas por Rijdsdijk e Hultink (2002): a função de autonomia refere-se à capacidade de operar sem interferência do usuário; a adaptabilidade envolve a capacidade do produto de integrar sua funcionalidade e o ambiente no qual se insere; a reatividade refere-se à habilidade do produto de reagir às mudanças do ambiente ou do contexto; a multifuncionalidade permite que um produto execute múltiplas funções; a cooperação conecta outros dispositivos para atingir um objetivo comum; a interação quasi-humana permite a comunicação com o usuário de forma intuitiva e natural; e a personalidade permite a apresentação do produto como um objeto racional.

A arquitetura-padrão dos produtos inteligentes, proposta por Miche, Schreiber e Hartmann (2009), é composta por dispositivos de entrada e saída, atuadores que iniciam as

funcionalidades internas, sensores, dados específicos dos produtos e um módulo de comunicação para conectar os dados ao ambiente. Esta arquitetura está representada na Figura 2-1.

Figura 2-2 - Arquitetura-padrão de um produto inteligente



Fonte: Adaptado de Miche, Schreiber e Hartmann (2009)

Segundo estes autores, a interação natural do usuário com o produto deve estar ligada a um determinado contexto, à sua percepção e reação planejada a este. A entrada de informação sobre este contexto é, normalmente, realizada através de diferentes sensores físicos e virtuais.

Miche, Schreiber e Hartmann (2008) apontam que os produtos inteligentes devem automatizar ao máximo os fluxos de modo a evitar necessidade de interação direta com o usuário. O Gerenciador de Interação é responsável pela execução de todos os fluxos de informação que possam ser executados automaticamente. Quando a automatização dos fluxos não é possível, o Gerenciador Multimodalidade escolhe a melhor combinação de dispositivos de interação no ambiente para apresentá-la ao usuário.

Toda informação demandada pelos produtos inteligentes, como dados técnicos de execução e manutenção das atividades, e manuais de usuário é representada pelo Armazenamento de dados, que pode ser acessado remotamente através de WiFi ou Bluetooth.

### 2.1.4.2 Fábrica inteligente

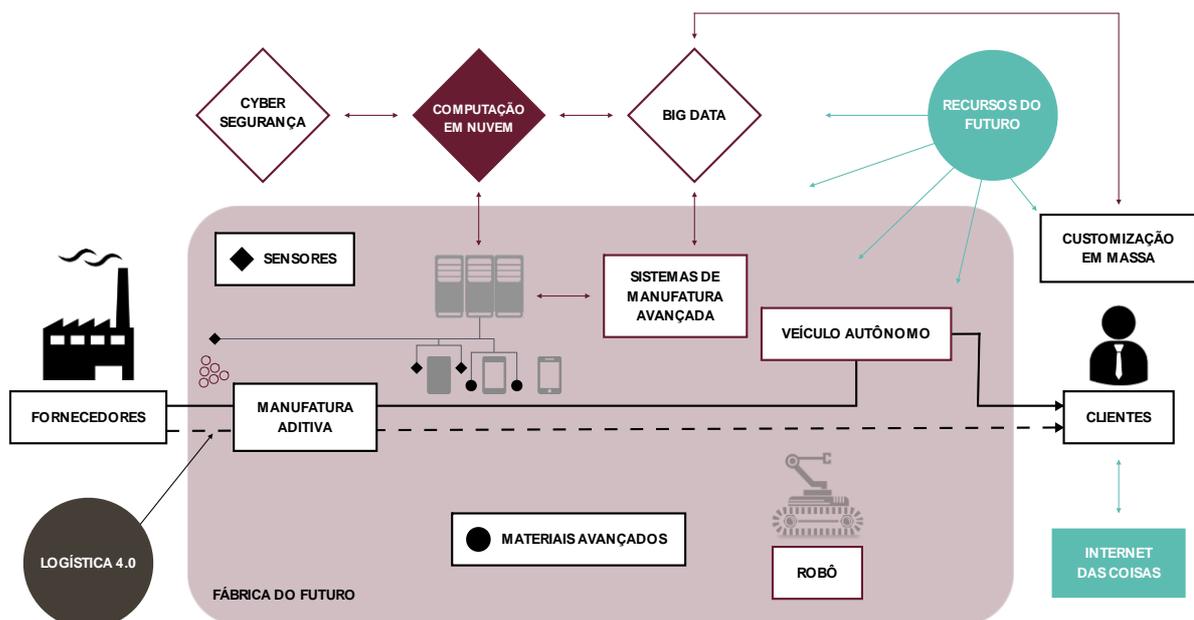
Fábrica inteligente ou Fábrica 4.0, segundo Blanchet *et al.* (2014), é um termo que remete a processos novos e radicais em empresas de manufatura. Nesses processos, dados são obtidos dos fornecedores, clientes e da própria empresa e avaliados para serem integrados a produção real. A crescente utilização de novas tecnologias - sensores, impressoras 3D e robôs - resultam em processos muito melhor ajustados e que respondem melhor no tempo real de produção. A produção em fábricas inteligentes envolve os conceitos da Indústria 4.0 segundo a estrutura apresentada na Figura 2-2.

A fábrica se relaciona com os fornecedores através de sistemas interconectados, com coordenação perfeita das atividades das partes e uma cadeia de suprimentos completamente integrada.

A produção propriamente dita utiliza tecnologias modernas como: a Impressão 3D e a Manufatura Aditiva em geral, permitindo a customização em massa e reduzindo as perdas de material como sucata; e a robotização, que possibilita alta produtividade a custos mais baixos e total transparência nos dados reportados.

Os materiais utilizados na produção também agregam valor à produção nas fábricas, com diferenciações técnicas cada vez mais desenvolvidas, estruturas inteligentes e conectividade.

Figura 2-3 - Estrutura de uma fábrica inteligente



Fonte: Adaptado de Blanchet *et al.* (2014)

Como suporte a essa produção, sensores são ligados aos equipamentos e produtos a fim de identificar defeitos e desvios, torná-los rastreáveis e previsíveis, e impor respostas automáticas do sistema de produção.

A gestão da produção é totalmente automatizada, com sistemas completamente interconectados e comunicação direta entre máquinas. Estes *Cyber-Physical Systems* são alimentados com *Big Data* resultantes de manufatura colaborativa da computação em nuvem, protegidos por mecanismos de segurança cibernética.

#### 2.1.4.3 Novas tecnologias de produção

Segundo Yan e Gu (1996), a indústria de manufatura de produtos vem enfrentando importantes mudanças desde a década de 90: a redução do tempo de desenvolvimento de produto e o aumento da flexibilidade na manufatura de lotes pequenos, cada vez mais variados.

Fazendo frente a essas mudanças, as tecnologias de *Computer-aided design and manufacturing* (CAD e CAM) melhoraram significativamente o design e manufatura tradicionais da produção. Onuh e Yusuf (1999) apontam que poucas tecnologias ofereceram tantas mudanças nos últimos anos como a Prototipagem Rápida.

A Prototipagem rápida é um termo que engloba um leque de novas tecnologias para produção de peças precisas diretamente de modelos do CAD em algumas horas, com baixa necessidade de intervenção humana (PHAM e GAULT, 1998, tradução nossa).

Para Upcraft e Fletcher (2003), por ser um conceito relativamente novo, é esperado que muitas das tecnologias de Prototipagem hoje existentes desapareçam e que outras ganhem destaque no mercado. Entre as tecnologias destacáveis, podemos citar: a Estereolitografia (SL), a Sinterização seletiva a laser (SLS), a Deposição de material fundido (FDM), a Modelagem multi-jatos (MJM) e a Impressão 3D (3DP).

A Estereolitografia, segundo Pham e Gault (1998), consiste na exposição de uma resina fotossensível a luz ultravioleta, solidificando-o e formando um polímero. A exposição é feita camada a camada, através de uma plataforma móvel que, imersa em um vaso com resina líquida, se move para baixo a cada camada modelada, acrescentando mais resina para ser solidificada na superfície.

Diferentemente da Estereolitografia, que utiliza material na forma líquida, a Sinterização seletiva a laser, utiliza material em pó, que é sinterizado através de laser de dióxido de carbono. Neste processo, o pó, pré-aquecido a uma temperatura ligeiramente inferior ao seu ponto de fusão, é aplicado através de um rolo rotativo sobre cada camada recém-sinterizada.

A tecnologia mais difundida através das máquinas de baixo custo é a Deposição de material fundido. A máquina de FDM, segundo Pham e Gault (1998) possui um cabeçote móvel que deposita material fundido sobre um substrato. Este material se solidifica após a extrusão, aglutinando-se às camadas depositadas precedentemente. Os modelos mais recentes desta máquina incluem dois cabeçotes, sendo um para o material da peça a ser fabricada e um para o material suporte.

A técnica de Modelagem com Múltiplos Jatos, segundo Upcraft e Fletcher (2003), tem sido bastante usada na criação de modelos para testar a geometria da peça, em materiais que não seriam normalmente usados para o produto final. A máquina de MJM possui um cabeçote de impressão contendo pequenos jatos que depositam gotas de polímeros termoplásticos sobre uma plataforma, que é abaixada quando a camada é finalizada.

Na Impressão 3D, que muitas vezes é utilizada como sinônimo de manufatura aditiva, camadas de pó são aplicadas em um substrato e, então, são aglutinadas seletivamente através de uma pasta pulverizada por um cabeçote.

#### *2.1.4.4 Produção customizada em massa*

Para sobreviver no mercado competitivo atual, e para satisfazer clientes mais exigentes, as empresas estão implementando a customização em massa, que é definida como a produção de produtos personalizados a um preço similar àquele da produção em massa (PINE, 1993).

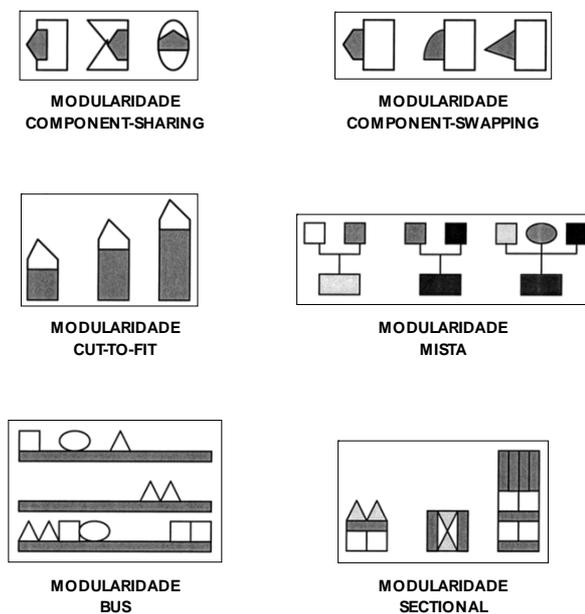
No conceito de produção customizada em massa, segundo Jiao e Tseng (1999), cada cliente é reconhecido como um indivíduo e a ele são disponibilizados produtos "sob-medida" a custos mais baixos, graças aos avanços na flexibilização dos processos de produção.

Smith *et al.* (2013) aponta que, visando a criação de produtos customizados com volume, custos e eficiência de produção em massa, a maioria das empresas utiliza a

montagem sob encomenda (*assembly to order - ATO*). Mas para atingir os resultados esperados em termos de customização, é preciso trabalhar em integração com o cliente, utilizando designs modulares, fábricas reconfiguráveis e cadeia de suprimentos integrada.

Muitos autores sugerem que a modularidade dos produtos é a chave para atingir customização a custos baixos. Ulrich e Tung (1991) desenvolveram uma tipologia de modularidades, apresentada na Figura 2-3. Esses diferentes tipos de modularidade estão ligados a fases específicas do ciclo do produto, caracterizando níveis maiores ou menores de integração do cliente na fabricação.

Figura 2-4 - Tipos de modularidade



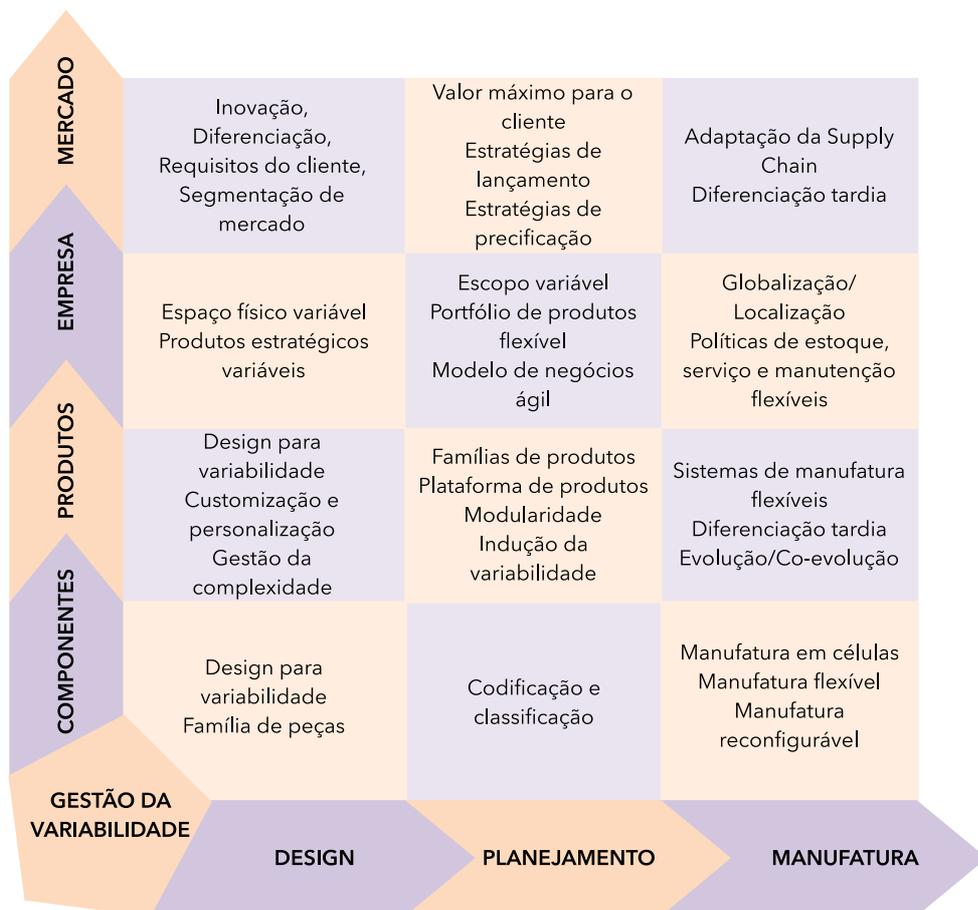
Fonte: Adaptado de Ulrich e Tung (1991)

As modularidades do tipo *Cut-to-fit* e *Component-sharing* requerem que os componentes tenham um design novo ou modificado; estes tipos de modularidade são definidos durante a fase de design e de fabricação (DURAY *et al.*, 2000).

Por outro lado, segundo Duray *et al.* (2000), durante as fases de montagem, os módulos são simplesmente rearranjados ou combinados de acordo com as especificações do cliente. As modularidades do tipo *Component swapping*, *sectional*, *mista* e *bus*, por exemplo, utilizam módulos padrões, sem alterações, que podem ser combinados para formar o produto final especificado pelo cliente.

ElMaraghy *et al.* (2013) apresenta as estratégias de gestão, as ferramentas técnicas e os facilitadores da variabilidade de produtos classificadas segundo as três atividades relacionadas à produção: design, planejamento e manufatura. Para cada fase do ciclo do produto, são considerados os impactos da variabilidade no produto, no processo e no mercado. O mapa dessas estratégias está representado na Figura 2-4.

Figura 2-5 - Mapa estratégico de gestão da variabilidade



Fonte: ElMaraghy *et al.* (2013)

### 2.1.5 Empresas engajadas

Neste item serão discutidas as relações de algumas empresas com a Indústria 4.0, tanto como fornecedoras de soluções quanto consumidoras das novas tendências dessa iniciativa.

A publicação Germany Trade and Invest (2014) apresentou alguns exemplos de empresas engajadas no compartilhamento de conhecimentos e tecnologias da Indústria 4.0, como a Bosch, a Festo, a SAP e a Trumpf.

A Bosch possui um papel duplo na Indústria 4.0 pois, ao mesmo tempo que aplica tecnologias e *softwares* para desenvolver sua própria manufatura, a empresa desenvolve e fornece soluções muito úteis para a iniciativa. É o caso das soluções em Fábrica 4.0 propostas pela Bosch Rexroth, dos equipamentos inteligentes para fábricas inteligentes, realizados pela Bosch Packaging, e do *software* de otimização do processo de manutenção de equipamentos, desenvolvido pela Bosch *Software*.

A Festo, líder internacional em fornecimento de tecnologia de automação para fábrica e automação de processos, participou no desenvolvimento do caso de aplicação da "Fábrica Resiliente", cujo conceito de flexibilidade foi reforçado pela Indústria 4.0, projeto lançado oficialmente pelo governo alemão em 2014.

A SAP tem se engajado em diversos projetos e iniciativas no contexto da Indústria 4.0, provendo tecnologias e soluções que ajudam as empresas a adotar as mudanças nas indústrias de manufatura.

Como líder global de tecnologia, com máquinas-ferramenta, tecnologias a laser, eletrônicos e tecnologia médica, a Trumpf participa da iniciativa governamental da Indústria 4.0 desde 2011, contribuindo para a definição da fábrica inteligente. Além disso, a empresa tem trabalhado para criar soluções de processos mais produtivos e eficientes de produção.

## **2.2 Estudos sobre fábricas de ensino**

Segundo Lamancusa *et al.* (2008), até 1950, as artes práticas dominavam o currículo de engenharia, e a ênfase estava na formação de engenheiros que pudessem ser imediatamente úteis na indústria. Eles adquiriam conhecimentos diretamente de visitas em campo e os resultados ajudavam a desenvolver um profundo conhecimento conceitual e entendimento intuitivo do comportamento de sistemas e máquinas. No entanto a publicação do Grinter Report em 1956 e o lançamento de Sputnik em 1957 causaram grande mudança no estudo da engenharia nos Estados Unidos, e o currículo tornou-se mais abstrato, com ênfase em cálculo e ciência.

Em contraponto, as fábricas de ensino foram desenvolvidas para transmitir conhecimento sobre conceitos e métodos de melhoria de processos a estudantes e participantes de seminários industriais no contexto real da manufatura (KREIMEIER *et al.*, 2014, tradução nossa).

Segundo Tisch *et al.* (2013), as fábricas de ensino devem integrar diferentes métodos de ensino com o objetivo de aproximar o processo de aprendizagem dos reais problemas industriais.

As fábricas de ensino estão em constante reinvenção, paralelamente aos avanços industriais. Kreimeier *et al.* (2014) afirma que as primeiras iniciativas de fábrica de ensino tinham como foco a melhoria de processos e a implantação da produção enxuta, mas que nos anos seguintes, as novas tecnologias e desafios deram espaço para a parte técnica da produção.

Com o advento das fábricas de ensino, diversos autores se engajaram a estudar os diferentes modelos de implementação e desenvolvimento dessa iniciativa. Nesta seção, serão apresentados três modelos desenvolvidos para a criação de fábricas de ensino e um voltado para a melhoria contínua destas.

### **2.2.1 Guia curricular para fábrica de ensino**

O guia curricular para fábrica de ensino (*Learning Factory Curriculum Guide - LFC-Guide*), proposto por Tisch *et al.* (2013), apresenta uma abordagem sistemática da criação de fábricas de ensino baseadas na prática e no desenvolvimento de competências específicas, que são os componentes-chave da metodologia.

Neste projeto de criação de um sistema de aprendizagem orientado à competência, a metodologia propõe-se a alinhar as especificações educacionais e as de infraestrutura tecnológica seguindo dois passos principais, identificados pelo autor como primeira e segunda transformações didáticas.

O principal resultado da primeira transformação didática é a formulação das competências desejadas, que podem ser classificadas em quatro categorias: competências especialistas e metodológicas, competências pessoais, competências orientadas à atividade e aplicação e competências de comunicação.

Para chegar à definição dessas competências na primeira fase da metodologia, é preciso identificar e classificar três aspectos da fábrica de ensino proposta: o tipo de produção (produção unitária, lotes, alto volume ou contínua), o propósito da fábrica (treinamento profissional, educação ou pesquisa em produção) e o grupo a quem ela se destina.

Na segunda transformação didática, as reflexões de ensino e método devem complementar a infraestrutura tecnológica da fábrica de ensino. Partindo das competências esperadas, deve-se primeiramente definir os métodos de ensino, antecipando a modelização do ambiente de aprendizagem, e garantindo que estes desenvolverão as competências ao máximo.

Figura 2-6 - Etapas do guia curricular para fábrica de ensino



Fonte: Elaboração própria

Para os autores, a escolha das tecnologias de fabricação e do produto-base da fábrica de ensino está intimamente ligada ao tipo de produção e às competências definidas na primeira transformação didática. O ajuste da tecnologia de fabricação e a escolha do produto constituem, portanto, a última etapa da modelização conceitual da fábrica de ensino e, junto às escolhas referentes ao ensino, correspondem à segunda transformação didática.

### 2.2.2 Fábricas de ensino holísticas

A contribuição de Kreimeier *et al.* (2014) para o tema é a representação de fábricas de ensino como um conceito holístico, integrando diferentes áreas que, na opinião dos autores, podem ser divididas em três tópicos: melhoria de processo; eficiência de recursos; e melhorias em gestão e organização.

No módulo de melhoria de processos, os autores propõem uma abordagem dividida em unidades de ensino, de complexidade crescente. Inicialmente, trabalham-se técnicas

intuitivas de melhoria de processo em situações-exemplo, com base na observação, padronização e divisão do trabalho. Em sequência, são introduzidos os conceitos mais complexos de perda, método 5S e auditorias em situações reais de trabalho.

Dando ênfase à cadeia de valor, o módulo de melhoria de processos continua com a aplicação de conceitos *lean*, como produção puxada, *Just-in-time* (JIT) e *Just-in-sequence* (JIS). A unidade de ensino final deste módulo é um resumo de todos os métodos e ferramentas expostos, tendo como objetivo avaliar a aprendizagem e identificar as melhorias potenciais.

O segundo módulo apresentado é a eficiência de recursos, cuja importância é um reflexo, principalmente, das restrições ecológicas e da crescente competitividade internacional em torno da produção eficiente. A didática criada para apresentar este módulo é baseada no ciclo de desenvolvimento de um produto sob uma condição particular de eficiência de recursos.

O terceiro módulo, em melhoria da gestão e organização, diferente dos dois primeiros que se relacionam com a parte técnica da produção, se insere na área de recursos humanos. As unidades de ensino deste módulo passam por gestão estratégica da produção, análise estrutural das atividades, gestão da mudança e responsabilidades legais do negócio.

### **2.2.3 Desenvolvimento de produtos para fábricas adaptáveis**

ElMaraghy *et al.* (2013) afirma que o aumento da variedade de produtos é motivado pela demanda dos consumidores por novos produtos, diferentes expectativas regionais e um grande número de segmentos de mercado com diferentes necessidades e especificações. Isso aumenta a competitividade entre fabricantes, que vislumbram na emergência de novos materiais e tecnologias a possibilidade de atender a essa demanda de novos produtos.

Os Sistemas de Manufatura Adaptável (*Changeable Manufacturing Systems* - CMS) são essenciais para a indústria orientada à mudança. Eles são necessários para implementar mudanças, quando requisitadas, com facilidade. O desafio é unir sistemas adaptáveis de manufatura com fábricas de ensino para criar fábricas de ensino adaptáveis (ELMARAGHY *et al.*, 2013).

### 2.3 Síntese da Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica desenvolvida nesta seção, além de introduzir os principais conceitos relacionados à Indústria 4.0 e às fábricas de ensino, é capaz de delinear as informações que devem ser levantadas e avaliadas nas próximas seções, a fim de propor um direcionamento adequado para a concepção da Fábrica POLI.

Com relação a ambientes produtivos baseados na Indústria 4.0, percebe-se, sobretudo, a relevância da aplicação de tecnologias que desenvolvem a comunicação na interface homem-máquina, como a Internet das Coisas e os *Cyber-Physical Systems*, facilitando a gestão da produção e das informações.

Além da interface do controle produtivo, a própria manufatura passa por mudanças estruturais e tecnológicas, motivada pela nova demanda dos clientes por produtos personalizados. As estruturas produtivas tornam-se flexíveis, predomina a produção unitária sobre a produção em massa, e os produtos são desenvolvidos para atender a estes requisitos de customização, promovendo grande enforque no design dos mesmos.

A fim de acompanhar essa revolução das fábricas, são propostas estruturas de ensino prático de manufatura em universidades. Essas estruturas, chamadas fábricas de ensino, utilizam-se da instalação de uma fábrica para ensinar conceitos de produção e de melhorias de processos aos alunos, e trocar informações com industriais através de estudos de casos reais e palestras.

A concepção de uma fábrica de ensino deve responder ao requisito de interdisciplinaridade, ao mapeamento claro das competências a serem desenvolvidas, ao planejamento de uma estrutura flexível de produção, à preocupação constante com a melhoria de processos e à definição de um produto-exemplo, que absorva os resultados da flexibilização da manufatura e da melhoria de processos.

### 3 MÉTODO DE TRABALHO

Este capítulo apresenta o método utilizado no desenvolvimento deste trabalho, que visa detalhar o projeto de criação de uma fábrica de ensino na Escola Politécnica da USP.

O desenvolvimento deste trabalho pode ser dividido em três macro etapas: levantamento das iniciativas, definição do escopo da Fábrica POLI e definição da infraestrutura da Fábrica POLI.

Figura 3-1 - Resumo do método de trabalho



Fonte: Elaboração própria

#### 3.1 Levantamento das iniciativas

Na seção relativa à pesquisa exploratória de fábricas de ensino, são inicialmente apresentadas as principais fábricas existentes, seus principais conceitos e suas infraestruturas. Expostos os principais modelos de fábrica existentes, será apresentada uma análise dos desafios e oportunidades para as próximas instalações.

As instalações apresentadas são: (i) as fábricas da MEEP, uma parceria entre as universidades do Estado da Pensilvânia, de Washington e de Porto Rico; (ii) a iFactory, na Universidade de Windsor, no Canadá; (iii) a CiP, na Universidade Tecnológica de Darmstadt, na Alemanha; (iv) as duas fábricas de ensino da Universidade Tecnológica de Munique; (v) a aIE na Universidade de Stuttgart e a (vi) fábrica de ensino com foco em PLM na Universidade EAFIT, na Colômbia.

A fim de identificar as deficiências e, conseqüentemente, as oportunidades do ensino prático na Escola Politécnica da USP, serão mapeadas as iniciativas já existentes na instituição e seus principais objetivos.

### **3.2 Definição do escopo da Fábrica POLI**

A segunda parte do desenvolvimento corresponde à definição dos conceitos e do escopo da Fábrica POLI.

Primeiramente, serão definidas quais competências a fábrica deve desenvolver, baseadas nas oportunidades de ensino da Escola Politécnica e nos conceitos da Indústria 4.0.

Com base das competências definidas, será proposto um tema para a fábrica, assim como um produto-exemplo, os quais devem ser explorados para atingir o desenvolvimento esperado. Este foco da fábrica deve, por sua vez, orientar quais equipamentos e materiais devem fazer parte da infraestrutura da fábrica.

### **3.3 Definição da infraestrutura da Fábrica POLI**

Na fase final do desenvolvimento, o escopo da Fábrica POLI, proposto na etapa anterior, deve ser transformado em infraestrutura, com a definição da configuração da fábrica através da capacidade desejada.

## 4 LEVANTAMENTO DAS INICIATIVAS

### 4.1 Fábricas de ensino

Segundo Matt, Rauch e Dallasega (2014), a primeira Fábrica de Ensino surgiu nos Estados Unidos, em 1994, como resultado de uma parceria pela educação da engenharia de manufatura.

Outra fábrica de ensino recentemente estabelecida é a iFactory do Centro de Sistemas de Manufatura Inteligente, em Windsor (Canadá). É a única dessa categoria na América do Norte e a segunda no mundo (o primeiro sistema similar foi estabelecido em Stuttgart) (MATT, RAUCH, DALLASEGA, 2014, tradução nossa).

Além da América do Norte, Wagner *et al.* (2012) exaltam a difusão desse conceito na Europa, sobretudo na Alemanha. Neste país, já existem dezenas de fábricas de ensino popularizadas, entre as quais destacam-se a *Process Learning Factory* (CiP), na Universidade Tecnológica de Darmstadt; as duas fábricas de ensino operadas pela Universidade Tecnológica de Munique, voltadas à Produtividade Energética e à Produção Enxuta; e a Fábrica de Ensino para Engenharia Industrial avançada (aIE), na Universidade de Stuttgart.

#### 4.1.1 Principais realizações

Nos tópicos a seguir, serão apresentadas as fábricas de ensino citadas, avaliando sua abordagem acadêmica, sua estruturação e seu funcionamento; e os desafios e oportunidades para as próximas fábricas de ensino.

##### 4.1.1.1 Fábricas de Ensino da MEEP

Segundo Lamancusa, Jorgensen e Zayas-Castro (1997), esta iniciativa é o produto da *Manufacturing Engineering Education Partnership* (MEEP), uma parceria colaborativa entre três universidades com fortes programas de engenharia (Universidade do Estado da Pensilvânia, Universidade de Porto Rico-Mayaguez e Universidade de Washington), um laboratório de alta tecnologia do governo (Laboratórios *Sandia National*), mais de 100

empresas parceiras e o governo federal que proveu fundos para esse projeto através do ARPA *Technology Reinvestment Program*.

Para os idealizadores da MEEP, a Fábrica de Ensino, combinada a um novo currículo, permite ao aluno de engenharia integrar aspectos de design e de manufatura, desenvolvendo nele qualidades essenciais para o século 21: bons conhecimentos dos fundamentos da engenharia, visão sistêmica da manufatura e realização de produtos, conhecimento de novas tecnologias e ferramentas, excelentes habilidades de trabalho em equipe e comunicação e motivação para o aprendizado constante. E essas transformações ocorreram com o engajamento de diferentes departamentos - Engenharias Mecânica, Industrial, Química e Elétrica, e Administração - das três universidades.

### Abordagem conceitual

Nesse novo currículo constam disciplinas especialmente desenvolvidas pela MEEP no lançamento da iniciativa. As disciplinas, citadas por Lamancusa, Jorgensen e Zayas-Castro (1997), são:

- *Análise de produto*: disciplina que examina como funcionam produtos e máquinas em termos de operação, montagem, design e outras considerações que determinam sua posição no mercado, a fim de desenvolver a aptidão para o design de engenharia;
- *Engenharia da concorrência*: disciplina que propõe estudos de casos e palestras de indústrias para introduzir conhecimentos sobre estratégias de desenvolvimento de produtos e processos, utilizando ferramentas para tomada de decisão, engenharia de valor agregado, análise de qualidade e planejamento de projetos;
- *Empreendedorismo baseado em tecnologia*: disciplina que, em parceria com a Escola de Negócios, apresenta os fundamentos do empreendedorismo do ponto de vista tecnológico e prático com ênfase em inovação e criatividade;
- *Engenharia de qualidade de processos*: disciplina que inclui sessões de laboratório, nas quais os alunos desenvolvem seus próprios experimentos, coletam dados e aplicam a análise estatística apropriada;
- *Projeto Interdisciplinar*: disciplina que oferece aos alunos de múltiplos departamentos a oportunidade de desenvolver o design de produtos e processos, trabalhando em equipes interdisciplinares em projetos sugeridos pelos parceiros industriais.

### Aspectos estruturais

Em 1997, segundo Lamancusa, Jorgensen e Zayas-Castro (1997), existiam 14000 metros quadrados dedicados às facilidades e equipamentos destas fábricas de ensino, distribuídas nas três universidades parceiras do MEEP.

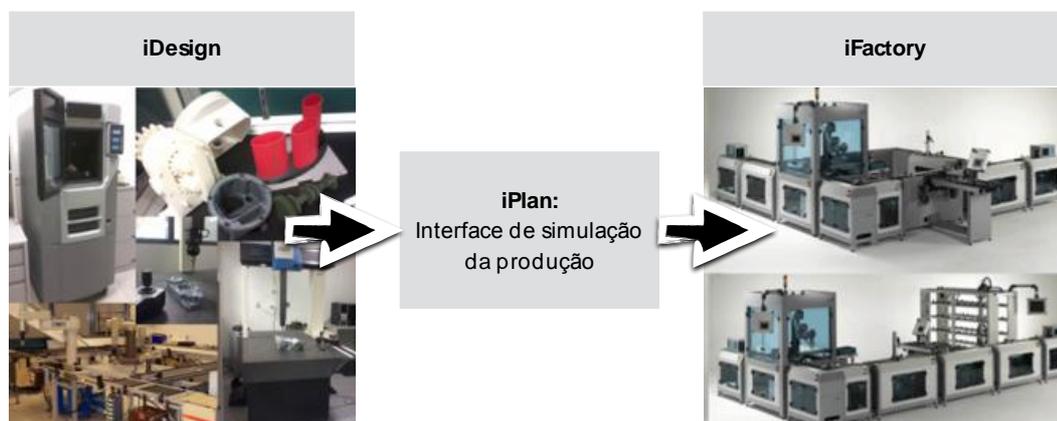
Cada uma das universidades possuía sua própria fábrica de ensino com equipamentos básicos, como máquinas-ferramenta, bancadas de trabalho, ferramentas manuais, solda, metrologia, materiais de referência e estações de trabalho CAD/CAM; e também facilidades especializadas, como máquinas CNC, injetoras, máquinas de medidas, montagem eletrônica, processamento de PVC, fundição e prototipagem rápida.

#### 4.1.1.2 iFactory

A iFactory, localizada no *Intelligent Manufacturing Systems Centre (IMS)*, na Universidade de Windsor, no Canadá, é um modelo diferenciado de fábrica de ensino. A Fundação para Inovação no Canadá e o Ministério de Pesquisa e Inovação de Ontário arrecadaram US\$797.622,00 em 2011 para apoiar o desenvolvimento da iFactory, a primeira fábrica de ensino deste tipo na América do Norte.

Wagner *et al* (2012) apresenta o centro IMS como uma infraestrutura em camadas, composta por duas instalações complementares: estúdio de inovação (iDesign) e a instalação física da iFactory.

Figura 4-1 - Fluxo produtivo da iFactory



Fonte: Elaboração própria, a partir de imagens do site do *IMS Centre* (2015)

### Abordagem conceitual

Segundo Wagner *et al.* (2014), iFactory foi desenvolvida e construída para promover agentes de flexibilização, como mobilidade, modularidade, escalabilidade, universalidade e compatibilidade, que são as principais características de Sistemas de Manufatura Flexível.

Edwards, Elmaraghy e Elmaraghy (2014) ressaltam a importância desta capacitação em ambientes flexíveis, principalmente em casos de necessidade de mudança da configuração da linha de produção em função do aumento da capacidade de produção ou, ainda mais frequentemente, do lançamento de novos produtos. Deste modo, a iFactory demonstra que sistemas reais de manufatura podem se adaptar às mudanças e se reestabelecer na produção imediatamente depois dessas situações.

### Aspectos estruturais

Segundo informações do próprio site da universidade, o estúdio de inovação, chamado iDesign, possui equipamentos que promovem o design inovador e a interação da equipe, através de displays interativos, aplicativos, gráficos de alta qualidade e suporte computacional geral para todas as fases do desenvolvimento de um produto e seus processos. Ainda no iDesign, modelos plásticos do produto podem ser realizados através de uma máquina de prototipagem rápida, que utiliza a tecnologia de deposição de material fundido.

A segunda instalação, a iFactory, é responsável pela fabricação dos produtos em uma linha de montagem altamente automatizada e modular, que é capaz de produzir peças como conjuntos de mesa com porta canetas, clips, relógios e outros itens, em mais de 200 variações, com a capacidade de 300 peças por hora. A fábrica inclui módulos *plug-and-play* que podem ser facilmente reconfigurados para mudar o layout e a funcionalidade do sistema. Ela possui conceitos únicos de interfaces e modularidade, que são essenciais para o desenvolvimento e validação de mudanças nos processos, na produção e nos produtos.

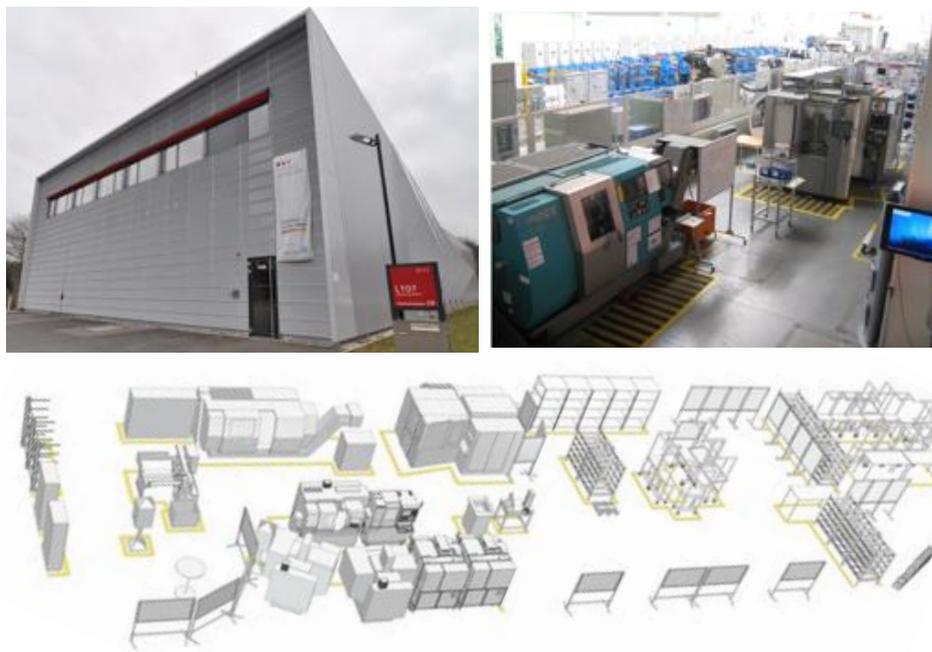
Segundo Wagner *et al.* (2012) a interface entre o iDesign e a iFactory é feita pelo chamado iPlan, que possui uma ferramenta que reconhece automaticamente a configuração escolhida na iFactory e simula a produção e montagem do produto.

#### 4.1.1.3 Fábrica de Ensino CiP

Cachay *et al.* (2012) apresenta a Fábrica de Ensino CiP (Center for Industrial Productivity), patrocinada pelo PTW na TU Darmstadt, como uma abordagem de aprendizagem orientada à prática.

A Fábrica de Ensino CiP foi instalada no Instituto de Gestão da Produção, Tecnologia e Máquinas-ferramenta. Ela é composta por equipamentos de usinagem, montagem, limpeza e qualidade (...). Esta fábrica é usada para ensinar tópicos sobre produção enxuta às indústrias e design avançado aos estudantes (WAGNER *et al.*, 2012, tradução nossa).

Figura 4-2 - Visão geral da infraestrutura da Fábrica de Ensino CiP



Fonte: Elaboração própria, a partir de imagens do site da IFF (2015)

#### Abordagem conceitual

O centro de competências da CiP se apoia em quatro atividades principais: ensino, pesquisa, treinamento e consultoria.

Como apoio ao ensino, o CiP propõe quatro disciplinas ligadas às suas atividades e dois módulos tutoriais. As disciplinas propostas para mestrandos são: Gestão da produção industrial, Produção enxuta, Gestão da qualidade - Sucesso através da excelência empresarial

e Processos de desenvolvimento de produtos em rede. Os tutoriais por sua vez são voltados para processos internos ao CiP, com módulos de CAD/CAM e de sequenciamento da produção.

Produção flexível e sistemas intra-logísticos, Usinagem flexível, Produção enxuta e Tecnologia de informação, Qualidade enxuta e Desenvolvimento de competências na produção enxuta são as cinco áreas de pesquisa oferecidas pela fábrica.

Os treinamentos na CiP são orientados aos conceitos da produção enxuta, ou *lean production*, sendo divididos em três fases: apresentação dos princípios básicos do *lean*, discussão sobre os elementos do *lean* (fluxo de material, fabricação e qualidade) e, por fim, cultura *lean*.

Ao lado de todas essas medidas que privilegiam a indústria, a fábrica de ensino em questão presta consultorias, em diversos temas, à empresas parceiras de pequeno e médio portes.

#### Aspectos estruturais

Segundo a página desta fábrica de ensino na internet, o CiP ocupa uma área de 500m<sup>2</sup>, na qual encontram-se todas as áreas de produção industrial, distribuídas em duas linhas de produção, com nove máquinas-ferramenta, e duas linhas de montagem subsequentes, onde dois produtos reais são produzidos: um cilindro pneumático com um número de variantes de um dígito e um motor de engrenagem com mais de 400 variantes.

Além das áreas de produção e montagem propriamente ditas, outras áreas como controle de qualidade, gestão de materiais, avaliação de indicadores e tópicos de produção enxuta aplicados à áreas de suporte (compras, vendas e controle de produção) fazem parte do contexto de imersão dos alunos em uma fábrica de natureza flexível.

#### *4.1.1.4 Fábricas de Ensino para a Produtividade Energética e Produção Enxuta*

O Instituto de Máquinas-ferramenta e Gestão Industrial da Universidade Tecnológica de Munique possui duas fábricas de ensino diferentes: a Fábrica de Ensino para Produtividade Energética e a Fábrica de Ensino para a Produção Enxuta (WAGNER *et al.*, 2012, tradução nossa).

### Abordagem conceitual

Segundo a página oficial da Fábrica de Ensino para Produtividade Energética (Lernfabrik für Energieproduktivität - LEP), a sua criação faz parte da estratégia de manter a Alemanha competitiva, sobretudo na produção industrial, através do uso eficiente de energia.

A LEP, que é resultado de uma parceria entre McKinsey&Company e a Universidade Tecnológica de Munique, se propõe a estudar métodos que otimizem o consumo de energia e que diminuam os custos desta.

A Fábrica de Ensino para Manufatura Enxuta (Lernfabrik für Schlanke Produktion - LSP) fornece, segundo a página oficial da fábrica, o tratamento teórico dos métodos e filosofia do Sistema Toyota de Produção e o aprofundamento prático dos conhecimentos adquiridos em um ambiente de produção real.

### Aspectos estruturais

A Fábrica para Produtividade Energética, instalada em um dos prédios da Universidade Tecnológica de Munique, ocupa uma área de 200 m<sup>2</sup>. Nela encontram-se todos os processos e equipamentos que consomem grande quantidade de energia e estes são utilizados para fabricar diferentes tipos de engrenagens para transmissão de potência, que são utilizados para identificar os efeitos das medidas, ferramentas e metodologias na redução do consumo de energia em um ambiente de produção existente.

Figura 4-3 - Visão geral da LEP



Fonte: Site da *iwb* (2015)

Segundo Wagner *et al.* (2012), a LEP é equipada, entre outras coisas, por um torno, um transportador, um forno, um robô, uma estação de montagem, um sistema de ar comprimido e um gerador. Ela tem um design adaptável, permitindo a implementação de medidas de otimização.

A segunda fábrica de ensino da Universidade Tecnológica de Munique, a Fábrica de Ensino para Produção Enxuta é voltada para a adaptabilidade. Isto é alcançado com mesas e equipamentos de montagem universal e com a alta mobilidade dos equipamentos. Além da montagem universal, a fábrica é equipada com sistemas *pick-to-light*, material de kanban para a alimentação do sistema, estação de controle de qualidade, mesas de planejamento digital e máquinas-ferramenta para SMED e TPM.

Figura 4-4 - Visão geral da LSP



Fonte: Site da *iwb* (2015)

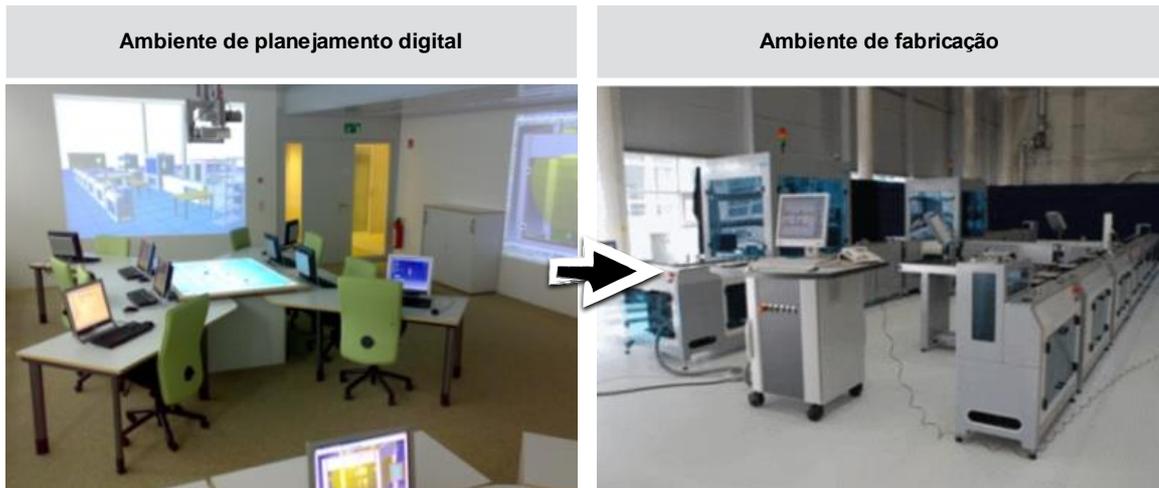
Dois tipos de redutores, com 24 variantes cada um, são produzidos na fábrica de ensino, utilizando princípios e metodologias da produção enxuta, apresenta Wagner *et al.* (2012).

#### 4.1.1.5 Fábrica de Ensino para Engenharia Industrial avançada

A Fábrica de Ensino para Engenharia Industrial avançada (aIE), no Instituto de Manufatura e Gestão Industrial (IFF) na Universidade de Stuttgart é focado na ligação entre o planejamento digital e a implementação do modelo físico no laboratório. Nas estações de trabalho digital, o planejamento virtual é realizado utilizando ferramentas de planejamento

digital. Este será implementado fisicamente através de trabalho manual nas estações, células robóticas, módulos *transfer* e tecnologia RFID (MATT, RAUCH, DALLASEGA, 2014, tradução nossa).

Figura 4-5 - Visão geral da infraestrutura da Fábrica de Ensino aIE



Fonte: Elaboração própria, a partir de imagens do site da aIE (2015)

### Abordagem conceitual

De acordo com Wagner *et al.* (2012), esta fábrica é usada para compartilhar conhecimentos sobre adaptabilidade e engenharia industrial e para pesquisas sobre sistemas de manufatura adaptáveis e reconfiguráveis.

A aIE desenvolve muitos projetos em parceria com a indústria, sobretudo relacionados às novas tecnologias de produção adaptável. Além disso, ela é usada para oferecer formações para gestores, designers e planejadores da indústria.

### Aspectos estruturais

A Fábrica de Ensino para Engenharia Industrial avançada preenche todos os requisitos de um ambiente de aprendizagem adaptável. Segundo Wagner *et al.* (2012), a fábrica é orientada para a flexibilidade e seu produto, um conjunto para mesa, está disponível em mais de 10000 variantes.

Figura 4-6 - Produto-exemplo da aIE: conjunto para mesa



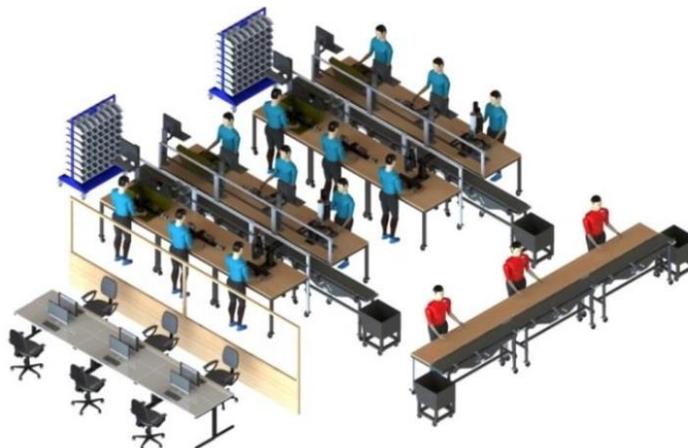
Fonte: Site da aIE (2015)

Além disso, o sistema possui módulos padronizados e móveis com elementos *plug-and-play*, que fomentam a configuração dos *layouts* das diferentes variantes. O sistema é composto também por equipamentos para montagem manual ou automática, transporte, estocagem e inspeção.

#### 4.1.1.6 Fábrica de ensino com foco em PLM

Segundo Orozco *et al.* (2015), a universidade EAFIT, na Colômbia, decidiu incentivar o conhecimento da indústria pela introdução de tópicos de *Product Lifecycle Management* (PLM) no programa de Mestrado da engenharia de produção, através, principalmente, do design de um laboratório original de PLM.

Figura 4-7 - Leiaute da planta da fábrica de ensino da EAFIT



Fonte: Orozco *et al.* (2015)

### Abordagem conceitual

A ideia principal do projeto é criar um ambiente de produção que complemente teoria e prática, expondo os alunos ao manejo da fabricação ao mesmo tempo que atendem aos requisitos de qualidade, custo e colaboratividade.

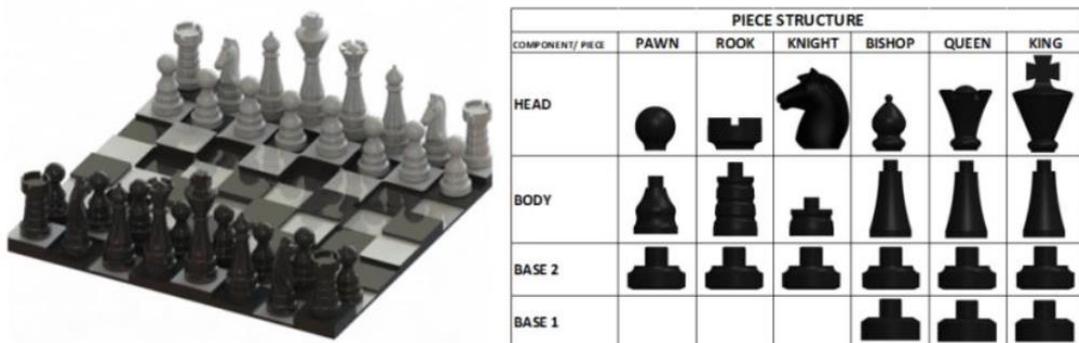
A didática do laboratório se concentra no curso de Manufatura Avançada, do programa de Mestrado de Ciência da Engenharia de Produção, com 48 horas de aulas teóricas e 32 aulas de atividades de laboratório, assistidas semestralmente por 40 alunos.

### Aspectos estruturais

A planta da fábrica é dividida em três áreas principais: engenharia, produção e montagem. A fabricação é realizada em duas linhas de produção que possuem racks de armazenagem de matéria-prima, 4 tornos CNC e 4 centros de usinagem.

O produto-exemplo fabricado é um jogo de xadrez modular, composto por um tabuleiro de madeira (280 x 280 mm) e 32 peças de duas cores diferentes.

Figura 4-8 - Jogo de xadrez modular



Fonte: Orozco *et al.* (2015)

Tabela 4-1 - Quadro-resumo das fábricas de ensino estudadas

	<b>Conceitos</b>	<b>Estrutura</b>	<b>Produto</b>
<b>MEEP</b>	Desenvolvimento dos fundamentos da engenharia, visão sistêmica da manufatura e realização de produtos, conhecimento de novas tecnologias e ferramentas, habilidades de trabalho em equipe e comunicação	Equipamentos básicos, como máquinas-ferramenta, bancadas de trabalho, ferramentas manuais, solda, metrologia Materiais de referência Estações de trabalho CAD/CAM; Facilidades especializadas: máquinas CNC, injetoras, máquinas de medidas, montagem eletrônica, processamento de PVC, fundição e prototipagem rápida.	-
<b>iFactory</b>	Estudos dos agentes de flexibilização, como mobilidade, modularidade, escalabilidade, universalidade e compatibilidade	Dividida em duas áreas específicas: iDesign e iFactory iDesign: displays interativos, aplicativos, impressora 3D para protótipos iFactory: linha de montagem automatizada e modular, com módulos <i>plug-and-play</i>	Kit de mesa
<b>CIP</b>	Ensino (disciplinas e módulos tutoriais), pesquisa, treinamento e consultoria nas áreas de produção flexível, produção enxuta, gestão da qualidade e tecnologia de informação	Duas linhas de produção, com 9 máquinas-ferramentas Duas linhas de montagem Controle de qualidade Gestão de materiais Avaliação de indicadores de produção enxuta	Cilindro pneumático e motor de engrenagem
<b>LEP</b>	Estudo de métodos de otimização do consumo de energia e de redução de custos	Equipamentos: torno, transportador, torno, robô Estação de montagem Design adaptável	Engrenagens
<b>LSP</b>	Estudo dos métodos e filosofia do Sistema Toyota de Produção Aprofundamento prático destes em um ambiente de produção real	Equipamentos de montagem universal e móveis Sistemas <i>pick-to-light</i> Material de kanban Estação de controle de qualidade Mesas de planejamento digital Máquinas-ferramenta para SMED e TPM	2 tipos de redutores
<b>aIE</b>	Sistemas de manufatura adaptáveis e reconfiguráveis Planejamento digital e implementação física	Células robóticas Módulos transfer Elementos <i>plug-and-play</i>	Kit de mesa
<b>PLM</b>	Introdução de tópicos práticos de PLM ao ensino	Tornos CNC Centros de usinagem	Jogo de xadrez modular

Fonte: Elaboração própria

#### ***4.1.2 Desafios atuais das fábricas de ensino***

As Fábricas de Ensino, segundo Cachay e Abele (2012), comparadas com o método tradicional de ensino, conquistaram performance de aplicação e conhecimento prático muito mais elevados. No entanto, restam alguns desafios a serem gerenciados para alcançar obter o máximo aproveitamento dessa iniciativa.

Inicialmente, as fábricas de ensino existentes eram planejadas por especialistas técnicos do ambiente a ser simulado. Por essa razão, os parâmetros eram focados no mapeamento autêntico dos cenários reais de uma fábrica, sem a aplicação didática e científica dos conceitos de eficiência e eficácia, que visam o desenvolvimento de competências.

Para Kuper *et al.* (2012), a solução para essa limitação é a participação ativa de educadores no desenvolvimento da fábrica a fim de analisar, avaliar, validar e reformular os processos. No entanto, segundo Tisch *et al.* (2013), o desenvolvimento de fábricas de ensino dificilmente se baseia em uma abordagem estruturada, limitando-se ao desenvolvimento baseado na intuição e experiência, que carregam esforços muito maiores, grande incerteza e resultados pouco satisfatórios.

Fábricas de ensino não são simples duplicações de fábricas industriais. Alguns industriais, quando expostos a elas, podem pensar "este não é um sistema que minha empresa pode utilizar". Deve-se deixar claro que os conceitos, estratégias e agentes de mudanças desenvolvidos e verificados através de fábricas de ensino podem ser usados para qualquer empresa que enfrenta o desafio de se manter competitiva e eficiente face à mudança contínua e variedade crescente de produtos (WAGNER *et al.*, 2012, tradução nossa).

Devido a sua popularização recente, para Wagner *et al.* (2012), pouco esforço foi engajado na classificação dos diferentes tipos de fábricas de ensino, assim como na especificação dos atributos de uma fábrica de ensino ideal. Como outra consequência do desenvolvimento tardio, as fábricas de ensino ainda não são comuns nos países em desenvolvimento devido, principalmente, ao alto custo associado a seu estabelecimento, optando-se por versões mais simples e limitadas, mas úteis em termos de educação, pesquisa e desenvolvimento.

## 4.2 Ensino prático na Escola Politécnica da USP

Antes de propor uma nova estrutura de ensino na Escola Politécnica, é necessário mapear as iniciativas similares existentes, afim de identificar oportunidades de atuação e melhorias.

### 4.2.1 Iniciativas selecionadas

Tendo em vista o grande número de laboratórios nos departamentos da Poli, o critério para selecionar estruturas similares foi a orientação à inovação e à interdisciplinaridade, além de potencial sinergia com a Fábrica POLI.

#### 4.2.1.1 InovaLab@POLI

Em 2011, a Pró-Reitoria de Graduação da USP lançou o projeto Pró-Inovalab, que visava o apoio a projetos de instalação de laboratórios destinados a aulas práticas inovadoras.

Os recursos, limitados a 500 mil reais por projeto, poderiam ser utilizados em pequenas reformas, compra de material ou *software*, instalação de equipamentos ou contratação de serviços. O InovaLab@POLI foi um dos projetos contemplados por essa iniciativa.

#### Abordagem conceitual

O InovaLab@POLI é um laboratório multidisciplinar que visa difundir os recursos de inovação aos alunos de graduação e contribuir para a formação de competências complementares, como: trabalho em equipe, conhecimento de mercado, criatividade na solução de problemas, capacidade de comunicação e empreendedorismo.

O laboratório oferece recursos avançados para projetos de engenharia (*softwares*, impressoras 3D, oficinas), atraindo, principalmente, professores e alunos de Engenharia da Escola Politécnica, mas também de Design e Administração.

Além da infraestrutura inovadora, o InovaLab@POLI desenvolve projetos que fortalecem a participação e complementam a formação dos alunos.

Entre os projetos desenvolvidos estão:

- A participação no curso de desenvolvimento de produtos e soluções da Universidade de Stanford (ME310), no qual alunos envolvidos no InovaLab@POLI trabalharam em conjunto com equipes internacionais, utilizando a infraestrutura do laboratório;
- O oferecimento da disciplina Desenvolvimento Integrado de Produtos, aberta a alunos de todas as especialidades da USP, com o objetivo de gerar soluções inovadoras por meio da abordagem de *Design Thinking*, com o suporte dos recursos do laboratório;
- A organização do emPROendedores, um evento com jovens empreendedores, recém-formados na Escola Politécnica.

#### Aspectos estruturais

O InovaLab@POLI possui uma Sala de Projetos e uma Oficina Mecânica de protótipos, ambas localizadas no Departamento de Engenharia de Produção, além de uma Oficina Eletrônica, localizada no Departamento de Sistemas Eletrônicos. Uma nova Oficina Mecatrônica, localizada no Departamento de Engenharia Mecatrônica, está em desenvolvimento.

Figura 4-9 - Sala de Projetos do InovaLab@POLI



Fonte: Site do InovaLab@POLI

Em um ambiente configurado de modo a favorecer o trabalho colaborativo, a Sala de Projetos oferece um amplo conjunto de *softwares* de engenharia, impressoras 3D e recursos para projetos de ergonomia.

O espaço físico é composto por duas salas de reunião e um salão com computadores, impressoras 3D e uma mesa flexível, além de TVs para apresentação e discussão de materiais digitais.

Além da sala de projetos, o InovaLab@POLI conta com uma Oficina Mecânica de protótipos, com bancadas de trabalho e ferramentas básicas, além de um torno CNC didático, um centro de usinagem CNC didático e uma cortadora a laser.

#### 4.2.1.2 Laboratório de Sistemas Integráveis

O Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI), que data de 1975, tem sua base de pesquisa na área de elétrica e computação, mas, devido ao novo contexto industrial totalmente conectado aos conceitos de *Cyber-physical Systems* e Internet das coisas, o laboratório tem adquirido uma orientação cada vez mais multidisciplinar.

#### Abordagem conceitual

Segundo a página do laboratório na internet, as áreas de pesquisa do LSI englobam Saúde Digital, Sistemas de Visualização Interativa, Tecnologias Assistivas e de Reabilitação, Tecnologias para a Educação, Sistemas Computacionais Integrados, TV Digital, Microeletrônica e Microfabricação; entre outras.

Atualmente, projetos na área de Internet das Coisas estão sendo lançados em parceria com a Universidade da Califórnia.

#### Aspectos estruturais

A infraestrutura do LSI está dividida em 5 módulos principais. São eles:

- Caverna Digital e Laboratório de Realidade Virtual e Aumentada: a Caverna Digital possui equipamentos de realidade virtual, realidade aumentada e computação gráfica,

com 5 telas que envolvem o usuário com imagens estereoscópicas; na sala de visualização, existem também 4 computadores workstation e quatro projetores; tudo com alta resolução e capacidade computacional;

- Microeletrônica e semicondutores: possui equipamentos da área de microeletrônica, semicondutores, segurança de redes e desenvolvimento de hardware de alto desempenho, além de equipamentos de eletrônica embarcada e centro de prototipagem.
- Estúdio Multimídia de Alta Definição: possui infraestrutura voltada para a criação de material audiovisual com conteúdos associados às atividades acadêmicas da USP.
- Infraestrutura de Virtualização e Alto Processamento: possui um supercomputador, diversos PS3 e 6 workstations, voltados para pesquisas em sistemas embarcados, computação de alto desempenho, computação distribuída, tecnologia de imageamento e redes de comunicação e segurança da informação.
- Centro de treinamento de projetistas de circuito integrado: possui duas salas de treinamento com 36 estações de trabalho cada e *softwares* comerciais de última geração.

#### ***4.2.2 Oportunidades de desenvolvimento***

Com os exemplos apontados no item anterior, podemos concluir que há uma grande preocupação em manter a Escola Politécnica alinhada às novas tecnologias e aos avanços industriais em geral.

No entanto, na maioria dos casos, as atividades exercidas nos laboratórios apontados são orientadas à inovação e ao desenvolvimento de produto, mas não diretamente à estrutura e configuração da produção ou à melhoria dos processos de fabricação.

A oportunidade identificada é, portanto, fortalecer a relação entre alunos de graduação e empresas, bastante presente nas iniciativas citadas, atuando ao lado deste mesmo público na formação voltada à estrutura produtiva.



## 5 DEFINIÇÃO DO ESCOPO DA FÁBRICA POLI

Neste capítulo será definida a estrutura conceitual da Fábrica POLI, baseada nos princípios coletados por processo exploratório de estudos teóricos e de outras iniciativas em fábricas de ensino, justapostos aos conceitos atuais da Indústria 4.0.

### 5.1 Definição das competências a serem desenvolvidas

Retomando o mapeamento de oportunidades existentes na Escola Politécnica da USP (item 4.2), as boas práticas nas fábricas de ensino já lançadas e seus desafios para o futuro (item 4.1) e os conceitos da Indústria 4.0 (item 2.1), também podemos definir qual o escopo de aprendizagem almejado e quais capacidades e competências devem ser desenvolvidas na Fábrica POLI.

#### 5.1.1 Competências ligadas à Indústria 4.0

A criação de uma fábrica de ensino inspirada nos conceitos da Indústria 4.0 é um grande passo para o desenvolvimento destes conceitos na indústria e no ensino do Brasil, que são ainda muito incipientes. Com base nisto, as competências que podem ser desenvolvidas são:

- Manipulação de *tags* **RFID** e **sensores**;
- Desenvolvimento de **produtos inteligentes**, nos moldes da **engenharia colaborativa**, e utilizando-se da aprendizagem de manipulação de *tags* RFID e sensores, e de programação;
- Conhecimento tecnológico e manipulação de **manufatura aditiva**;
- **Virtualização de fábricas**, através de simuladores específicos, propondo mudanças na configuração de **fábricas flexíveis** de empresas parceiras, que tragam benefícios produtivos;
- Compartilhamento e troca de informações **em nuvem** entre os projetos desenvolvidos na Fábrica e com as empresas parceiras;

### ***5.1.2 Competências ligadas às boas práticas em fábricas de ensino***

Concluída a pesquisa exploratória das fábricas de ensino existentes, que abordou os avanços desenvolvidos na área, apresentou casos de sucesso na implantação e definiu os atuais desafios desta iniciativa, é possível reconhecer alguns princípios que serão aplicáveis à Fábrica POLI:

- As competências pré-definidas devem abranger disciplinas de todas as engenharias, seguindo o princípio de uma **fábrica de ensino holística**;
- A fábrica deve reforçar os conceitos de **produção enxuta** e **gestão da qualidade**;
- O produto-exemplo escolhido e seus processos de produção e montagem devem valorizar e possibilitar o conceito de **manufatura flexível**;
- O produto-exemplo deve apresentar uma **problemática real** de design e produção;
- Deve-se incentivar e apoiar a **interação com empresas** no dia-a-dia da fábrica de ensino.

### ***5.1.3 Competências ligadas às oportunidades de desenvolvimento na Poli***

Com base no item 4.2.2 deste trabalho, algumas deficiências da Escola Politécnica, em termos de ensino prático, podem ser supridas através da Fábrica POLI.

A aprendizagem oferecida pela Fábrica POLI deve integrar efetivamente, e não só a caráter opcional, a formação dos alunos. Para isso, o laboratório pode ser utilizado tanto por disciplinas obrigatórias já existentes quanto por novas disciplinas a ele diretamente ligadas. Alguns exemplos de disciplinas que podem ser desenvolvidas com o suporte do laboratório estão apresentados na Tabela 5-1.

Por outro lado, novas disciplinas podem ser inseridas na estrutura curricular da Poli, como por exemplo:

- Desenvolvimento de Produtos Inteligentes
- Programação para a Internet das Coisas
- Tecnologias modernas de produção

Tabela 5-1 - Disciplinas integráveis à Fábrica POLI

<b>GA</b>	<b>Departamentos</b>	<b>Disciplinas</b>
Poli	Optativas	Criação de Negócios Tecnológicos Desenvolvimento Integrado de Produtos
Civil e Ambiental	Hidráulica e Ambiental	Engenharia e Meio Ambiente
	Hidráulica e Sanitária	Ecoeficiência na Indústria
	Transportes	Logística
Computação	Computação e Sistemas Digitais	Engenharia de Informação Inteligência Artificial Interação Humano-Computador
Elétrica	Sistemas Eletrônicos	Eletrônica de Controle Industrial Inovação em Engenharia
	Telecomunicações	Automação da Manufatura Controle de Processos Industriais Introdução à Inteligência Computacional
Mecânica	Mecânica	Noções e Desenhos Técnicos de Instalações Industriais Tecnologia e Desenvolvimento Social I e II Propriedades e Seleção de Materiais para Engenharia Mecânica
		Mecatrônica
	Naval e Oceânica	Logística e Transportes
Química	Produção	Automação e Controle Controle da Qualidade Engenharia Econômica e Finanças Ergonomia em Projetos de Engenharia Gestão da Tecnologia da informação Gestão de Projetos em Design Logística e Cadeia de Suprimentos Projeto da Fábrica Projeto do Produto e Processo Projeto Integrado de Sistemas de Produção Projeto, Processo e Gestão da Inovação
		Química
	Minas e Petróleo	Técnicas de Caracterização de Materiais

Fonte: Lista de disciplinas do Jupiterweb

## 5.2 Definição do foco e do produto-exemplo

A maioria das fábricas de ensino estudadas apresenta um ambiente temático para as atividades desenvolvidas, assim com um produto-exemplo que é frequentemente desenvolvido e fabricado na própria fábrica. A definição deste produto de trabalho é, portanto, parte essencial do escopo de criação da Fábrica POLI.

### 5.2.1 O ambiente da fábrica

Tendo como inspiração as duas fábricas de ensino da Universidade Tecnológica de Munique, uma orientada à produtividade energética e outra à produção enxuta, que tratam de temas específicos com uma abordagem sistêmica, identificamos o interesse de propor também para a Fábrica POLI uma temática específica. A definição de um tema para a fábrica de ensino favorece o amplo desenvolvimento do setor estudado, identificando neste oportunidades de inovação e de melhoria, sob a ótica das diferentes áreas da engenharia.

A Pesquisa sobre Mobilidade Urbana, realizada pelo Ibope Inteligência com 700 moradores da cidade de São Paulo, lançada em setembro de 2015 apontou que o trânsito e o transporte público são considerados, respectivamente, as quarta e a quinta áreas mais problemáticas, atrás apenas da segurança pública, da educação e do desemprego.

Esse cenário, embora pessimista, revela oportunidades de investimento em alternativas de mobilidade, pois 80% dos entrevistados afirmaram que deixariam de usar carro se houvesse uma boa alternativa de transporte. Esta oportunidade intrínseca à crise dos transportes na cidade de São Paulo fundamenta a escolha da mobilidade como tema de fundo da Fábrica POLI.

A mobilidade urbana e suas implicações têm se configurado como um dos maiores desafios deste século para a sustentabilidade nas cidades. No Brasil, a mobilidade urbana reflete diariamente uma das principais insatisfações expostas pela população. (...) A divergência de interesses e o desequilíbrio das dimensões da sustentabilidade evidenciaram a ineficiência dos mecanismos de gestão da mobilidade urbana (SEABRA, TACO, 2013).

Em São Paulo, a cidade mais populosa do Brasil, a crise da mobilidade urbana é ainda mais preocupante. Segundo Ulian (2015), a atual situação da mobilidade na cidade é resultado de um conjunto de fatores, como o meio físico (relevo e hidrografia); o rápido crescimento

populacional urbano relacionado ao crescimento industrial; e a política desenvolvimentista que, historicamente, sobrepõe o crescimento econômico ao desenvolvimento social.

### **5.2.2 O produto-exemplo e suas oportunidades**

Através do produto-exemplo de uma fábrica de ensino, devemos ser capazes de desenvolver outras competências além da produção unitária. O produto definido deve oferecer oportunidades de estudo e de capacitação alinhadas àquelas definidas no item 5.1.

Além dos pré-requisitos de atendimento às competências objetivadas, o produto deve ser compatível com duas importantes limitações atuais da universidade: custo e espaço. O produto escolhido deve ter um custo acessível e ser compacto o suficiente para ser estudado *in loco*, quando necessário.

No contexto de mobilidade proposto para a Fábrica POLI, escolhemos a bicicleta como produto representante. Algumas das áreas de estudo possibilitadas por essa escolha serão detalhadas a seguir.

#### **5.2.2.1 Mobilidade urbana**

A preocupação ambiental, a busca crescente por modais sustentáveis e o conseqüente encorajamento de novas formas de locomoção em áreas urbanas foram os incentivos para a adoção da mobilidade como pano de fundo da Fábrica POLI.

A bicicleta, produto-exemplo escolhido para representar a fábrica, tem se destacado cada vez mais como uma alternativa sustentável para o transporte. Devido a esta popularização crescente, muitas iniciativas de apoio ao uso de bicicletas como meio de transporte têm sido objeto de pesquisa.

Serviços de compartilhamento de bicicletas públicas estão se tornando mais e mais populares nos últimos anos (KALTENBRUNNER *et al.*, 2010). Inspirado pelos problemas enfrentados pelos usuários destes serviços em Barcelona, como a dificuldade de encontrar bicicletas disponíveis e a impossibilidade de devolver a bicicleta no seus destinos finais devido à lotação das estações, Kaltenbrunner *et al.* (2010) contribuiu para a solução destes problemas através da análise dos padrões de mobilidade que levaram a previsões de curto

prazo do número de bicicletas disponíveis nas estações. Esses dados podem ajudar tanto no planejamento de instalação de estações quanto na disponibilização dessas informações em plataformas online.

Dell’Olio *et al.* (2014), adotando a cidade espanhola de Santander, no norte da Espanha, como laboratório, interrogou potenciais usuários de bicicleta, primeiramente identificando seus trajetos diários, para então envolvê-los em um questionário que media indiretamente a importância relativa que estes davam a certas variáveis associadas à mobilidade em bicicleta. Com esses dados, foram desenvolvidos modelos que identificaram que as variáveis mais relevantes para os potenciais usuários eram o custo e o clima, fornecendo informações importantes para o desenvolvimento de medidas encorajadoras da mobilidade sustentável.

Estes e muitos outros estudos na área de mobilidade urbana podem ser aplicados para cidades do Brasil, além de servirem de inspiração para outras investigações na área de engenharia de tráfego, logística e pesquisa operacional.

#### *5.2.2.2 Movimento e estabilidade*

Segundo Souh (2015), desde que a bicicleta atingiu a forma atual, no final do século 19, muitas análises dinâmicas têm sido realizadas para explicar seu balanceamento e direção.

São exemplos destes estudos: desenvolvimento de equações lineares dinâmicas para a bicicleta atual assumindo rodas com rolamento perfeito; discussão sobre modelização e controle sob efeitos da flexibilidade do quadro da bicicleta e de forças laterais; estudos teóricos e experimentais do modo de oscilação de uma bicicleta; e análises dinâmicas baseadas em modelos lineares e não lineares considerando forças dos pneus, forças motrizes e flexibilidade.

Neste tema, podem ser envolvidas disciplinas de Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica (ênfase em Controle e Automação).

### 5.2.2.3 Ergonomia e customização

Com o passar dos anos, as bicicletas deixaram de ser usadas unicamente como um meio de locomoção para se tornarem um lazer esportivo. Essa mudança de perfil de usuários aliada à preocupação com o conforto dos pilotos têm colocado em destaque o tema da customização no desenvolvimento de bicicletas.

Hsiao, Chen e Leng (2015) apontam algumas realizações nessa área: inclusão do grau de conforto nos critérios de projeto e desenvolvimento de bicicletas, incorporando o conceito de "adaptar o objeto ao corpo humano"; conclusão de que a maioria dos acidentes com bicicleta está relacionado ao ajuste inadequado do selim, do guidão ou dos pedais; otimização da postura de direção através da altura do selim; criação de um método de design de bicicletas baseado nas dimensões do corpo humano com validação ergonômica; entre muitas outras.

Avaliação ergonômica de bicicletas é tema de diversas engenharias, mas sobretudo Mecânica e de Produção, na área de Desenvolvimento de Produto. Essa variabilidade de produtos, resultante da adaptação de bicicletas a corpos com diferentes dimensões, traz consigo o conceito de produção customizada, assunto amplamente discutido no contexto de Indústria 4.0.

### 5.2.2.4 Custos

Como resultado dos crescentes investimentos em projetos de infraestrutura implementados para fomentar sistemas de transporte mais sustentáveis, cada vez mais estudos têm sido realizados envolvendo análises de custo e benefício entre bicicletas e outros meios de transporte.

O estudo realizado por Gössling e Choi (2015), desenvolvido em Copenhague, na Dinamarca, compara os custos e os benefícios de carro e bicicleta, os meios de transportes mais importantes da cidade, confrontados com acidentes, mudanças climáticas, saúde e tempo de viagem. Wang (2011), por sua vez, comparou, em grandes cidades da China, os custos totais de sete meios de transporte diferentes, inclusive a bicicleta, em situações com intensidades de trânsito diferentes.

Além das análises de custo relacionadas à utilização dos modais, existem estudos voltados para a redução de custos com materiais e produção de bicicletas e criação de bicicletas com materiais recicláveis.

A redução de custos através da produção e escolha eficiente de materiais constitui uma área de interesse para todas as engenharias.

#### 5.2.2.5 *Materiais*

Os avanços nas tecnologias de produção e na descoberta de novos materiais se estendem também ao desenvolvimento das bicicletas modernas.

O grafeno, um material derivado do grafite e formado por átomos de carbono dispostos na forma hexagonal, apresenta grandes potencialidades na fabricação de peças e componentes de bicicletas, podendo ser utilizados até mesmo em pneus ultraleves. Segundo o site MTB Brasília (2015), o grafeno, que já é considerado o material do futuro, é 200 vezes mais resistente que o aço, além de transparente, flexível, elástico, altamente tolerante a altas temperaturas; também possui elevada condutividade elétrica, possibilitando a utilização do quadro da bicicleta como condutor para microcomputadores e transmissões eletrônicas.

A Renishaw, única fabricante de máquinas de manufatura aditiva que imprime peças metálicas no Reino Unido, desenvolveu, segundo seu site oficial (2014), o primeiro quadro metálico de bicicleta impresso em 3D no mundo, em parceria com a Empire Cycles. Este quadro foi fabricado com liga de titânico, resistente à tração e à corrosão, e cerca de 33% mais leve do que o original.

#### 5.2.2.6 *Gadgets*

Os *Cyber-Physical Systems* também são encontrados em bicicletas. São inúmeras as invenções e adaptações pensadas para facilitar e dar mais conforto à locomoção dos usuários.

O site Hongkiat, desenvolvido especialmente para *designers*, *bloggers*, programadores e amantes de tecnologia, apresenta conteúdo relacionado com design, tecnologia e invenções. Nele foi publicada uma lista com alguns *gadgets* interessantes para usuários de bicicletas.

Muitos dos *gadgets* apresentados são voltados à segurança do usuário, como: sinal de mudança de direção, com conexão sem fio, luz de LED e alerta sonoro; dispositivo conectado a um GPS que indica, através de um mini-sinalizador, quais direções tomar; sensor ligado ao capacete que, em caso de acidente, alerta os contatos do usuário, enviando-lhes sua localização exata; e capacete que se infla quando detecta a iminência de um acidente.

Outros, aproveitam a energia produzida através das pedaladas para transmissão à outros equipamentos. É o caso do gerador portátil conectado à bicicleta, com saída USB; e do equipamento portátil que transforma uma bicicleta comum em elétrica.

O diagrama de Venn apresentado na Figura 5-1 resume as possíveis relações interdisciplinares tendo a mobilidade como tema da Fábrica POLI.

Figura 5-1 - Diagrama de Venn dos temas passíveis de estudo



Fonte: Elaboração própria

### 5.2.3 Componente a ser fabricado

Além da escolha do tema e do produto-exemplo que orientarão as capacitações e pesquisas na Fábrica POLI, é preciso definir uma peça que possa ser fabricada nas imediações da fábrica de ensino.

A produção desta peça, escolhida entre os componentes de uma bicicleta padrão, deve abordar os principais conceitos característicos da produção no contexto da Indústria 4.0: inovação, customização e novas tecnologias.

Na Figura 5-1 estão identificadas as partes de uma bicicleta, dentre as quais pré-selecionamos alguns componentes de tamanho reduzido, passíveis de fabricação nas instalações da Fábrica POLI: biela, pedal, desviador, câmbio posterior, freios e manete do freio.

Figura 5-2 - Partes de uma bicicleta



Fonte: Adaptado de Angeli (1994)

A escolha do componente que será produzido, entre os seis pré-selecionados, é feita através de uma matriz de decisão, utilizando pesos de 1 a 5 (onde 1 é o menos relevante e 5 é o mais relevante) para os critérios, que são:

- Inspirações para inovação: determina o potencial de desenvolvimento de soluções inovadoras integradas ou relacionados ao componente selecionado. Peso: 1.
- Potencial de customização: determina a capacidade de customização do componente, seja através de redimensionamento ergonômico ou substituição de materiais. Peso: 4.
- Possibilidade de utilização de novas tecnologias: determina a possibilidade de fabricar o componente utilizando-se de novas tecnologias como a impressão 3D. Peso: 5.

Antes de atribuir notas de 1 a 5 aos componentes de bicicleta pré-selecionados, podemos resumir algumas possibilidades de cada um relacionadas à inovação, à customização e a novas tecnologias.

Tabela 5-2 - Avaliação qualitativa dos componentes da bicicleta

	<b>Inovação</b>	<b>Customização</b>	<b>Novas tecnologias</b>
<b>Biela</b>	-	Diferentes materiais metálicos	Pode ser produzida com impressoras 3D de metal
<b>Câmbio posterior</b>	Câmbio eletrônico	Diferentes materiais metálicos	Pode ser produzida com impressoras 3D de metal
<b>Desviador</b>	Com o câmbio eletrônico, ativa um motor para troca de marcha	Diferentes materiais metálicos	Pode ser produzida com impressoras 3D de metal
<b>Freios</b>	Transformação da energia cinética do freio em energia elétrica	Diferentes materiais metálicos e materiais orgânicos para as pastilhas de freio	Pode ser produzida com impressoras 3D de metal
<b>Manete do freio</b>	-	Opções ergonômicas Materiais variados	Pode ser produzido com impressoras 3D variadas
<b>Pedal</b>	Pedal com GPS, pedal elétrico	Opções ergonômicas Materiais variados	Pode ser produzido com impressoras 3D variadas

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5-3 - Avaliação quantitativa dos componentes da bicicleta

	<b>Inspirações pra inovação</b>	<b>Potencial de customização</b>	<b>Possibilidade de utilização de novas tecnologias</b>	<b>Total</b>
<b>PESOS</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	
Biela	1	2	3	24
Câmbio posterior	3	2	3	26
Desviador	3	2	3	26
Freios	3	4	3	34
Manete do freio	1	5	5	46
Pedal	5	5	5	50

Fonte: Elaboração própria

O resultado da matriz de decisão aponta o pedal como o componente mais adaptado aos interesses da Fábrica POLI e à sua infraestrutura.

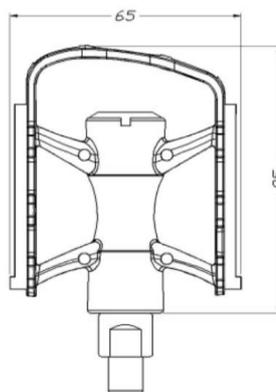
Segundo o Guia de compras de pedais de bicicleta, existem três tipos básicos de pedais, cuja escolha depende principalmente da modalidade de ciclismo praticada pelo usuário: os pedais plataforma, os pedais de encaixe e os pedais presilha ou "firma-pé".

- Os pedais plataforma são o tipo mais comuns, principalmente pela facilidade de uso, já que podem ser usados com sapatos comuns.
- Os pedais de encaixe, por outro lado, necessitam de uma sapatilha específica, compatível com o sistema de encaixe utilizado no pedal, que mantém os pés presos a ele. Este pedal evita que os pés escorreguem e possibilita maior desempenho e eficácia na atividade.
- Os pedais presilha são pouco indicados no ciclismo profissional por comportar fivelas que prendem os pés ao pedal e dificultam a liberação do ciclista em caso de acidentes.

Cada um desses três tipos básicos de pedais dá origem a diferentes modelos, devido aos materiais utilizados e aos diferentes designs possíveis.

Segundo o Procedimento de Fiscalização de Componentes de Bicicleta de Uso Adulto, publicado pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) em março de 2012, pedais para bicicleta de uso adulto possuem dimensões de largura superior a 65mm e comprimento superior a 85mm.

Figura 5-3 - Pedal de bicicleta



Fonte: INMETRO (2012)

Quanto ao design, existe ainda a possibilidade de customização orientada a cada usuário, favorecendo a ergonomia do produto.

Um exemplo de customização orientada ao design é o desenvolvimento do "*Lady pedals*", um pedal especial projetado e fabricado em uma impressora 3D, que permite que mulheres possam pedalar com sapatos de salto, que ocupou a terceira posição na Feira Tecnológica de Desafios da Universidade Católica do Chile em 2014.

Além disso, pedais de bicicleta permitem a integração em *Cyber-Physical Systems*, como é o caso do "*Connect pedal*", o pedal inteligente para bicicletas desenvolvido pela *Connect Cycle* (2015), equipado com GPS e GPRS, que rastreia a atividade física do usuário. O pedal armazena dados como rota, inclinação e calorias queimadas no próprio pedal e as transmite para um aplicativo de celular.

Figura 5-4 - "*Lady pedals*" e "*Connect pedal*"



Fonte: Sites da Universidade Católica do Chile (2014) e da startup "*Connect Cycle*" (2015)

### 5.3 Definição de equipamentos

A listagem dos equipamentos utilizados na Fábrica POLI depende não somente da peça a ser produzida, mas também das outras atividades que almejamos desenvolver na fábrica de ensino.

O componente definido para fabricação na Fábrica POLI, o pedal de bicicleta em diferentes tamanhos e formas, necessita de um trabalho especial em design de peça, definindo os principais parâmetros ajustáveis e preparando a produção com precisão.

Na linha de produção, devemos considerar, além da tecnologia utilizada para fabricar a peça escolhida, a flexibilidade e a facilidade de transformar sua configuração quando necessário. Isto permite que a fábrica altere periodicamente a escolha das peças produzidas e possa testar novas configurações de fábrica visando melhorar a produtividade.

Além do suporte de design e configuração da produção, devemos definir, com base nos resultados dos levantamentos das iniciativas em Fábrica de Ensino e estruturas similares, quais outras ferramentas de fabricação e de suporte agirão como facilitadores da moldagem de competências na Fábrica POLI.

Quando houver uma lista de opções similares, a seleção do equipamento adequado será feita através de uma matriz de decisão simples ou decisão multicritério AHP (*Analytic hierarchy process*).

A matriz de decisão simples é aplicada quando o grau de importância dos diferentes critérios de escolha é bastante claro. A decisão multicritério AHP, por outro lado, é aplicada quando justifica-se a necessidade de estabelecer uma hierarquia precisa entre os critérios.

O método AHP indicado por Saaty (1980) é composto de três etapas: a definição da contribuição de cada critério para o objetivo final, a avaliação do desempenho das alternativas em cada critério e, por fim, a avaliação final da prioridade de cada alternativa.

As comparações entre critérios e entre alternativas são realizadas utilizando a escala de importância relativa de Saaty (1980), apresentada na Tabela 5-4.

Tabela 5-4 - Escala de importância relativa de Saaty (1980)

<b>Escala</b>	<b>Avaliação Numérica</b>	<b>Recíproco</b>
Extremamente preferido	9	1/9
Muito forte a extremo	8	1/8
Muito fortemente preferido	7	1/7
Forte a muito forte	6	1/6
Fortemente preferido	5	1/5
Moderado a forte	4	1/4
Moderadamente preferido	3	1/3
Igual a moderado	2	1/4
Igualmente preferido	1	1

Fonte: Saaty (1980)

O resultado da comparação entre critérios é chamado vetor prioridade ou de Eigen, que apresenta os pesos relativos entre os critérios, e seu cálculo está representado na Tabela 5-5.

Tabela 5-5 - Exemplo de cálculo do vetor de Eigen

	<b>Critério 1</b>	<b>Critério 2</b>	<b>Cálculo</b>	<b>Vetor de Eigen</b>
<b>Critério 1</b>	1	9	$(1/1,11 + 9/10)/2$	0,9
<b>Critério 2</b>	1/9	1	$((1/9)/1,11 + 1/10)/2$	0,1
<b>Total</b>	1,11	10	-	1

Fonte: Elaboração própria

As alternativas são, então, confrontadas duas a duas, em cada um dos critérios. O peso da alternativa é calculado de forma análoga ao vetor de Eigen, conforme a Tabela 5-6.

Tabela 5-6 - Exemplo de cálculo de avaliação de alternativas

<b>Critério 1</b>				
	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>	<b>Cálculo</b>	<b>Peso</b>
<b>Alternativa 1</b>	1	8	$(1/1,125 + 8/9)/2$	0,89
<b>Alternativa 2</b>	1/8	1	$((1/8)/1,125 + 1/9)/2$	0,11
<b>Total</b>	1,125	9	-	1

Fonte: Elaboração própria

O resultado final da prioridade de uma alternativa é obtido pela somatória dos produtos do peso relativo do critério pelo peso da alternativa naquele critério.

### 5.3.1 Equipamentos para design e fabricação

Os equipamentos para design e fabricação foram selecionados com base no levantamento das diferentes infraestruturas encontradas em fábricas de ensino e dos processos tradicionais de uma fábrica de bicicletas.

O maquinário tradicionalmente presente em fábricas de ensino inclui, sobretudo, centros de usinagem CNC, tornos CNC e impressoras 3D.

Sendo o site especializado Ensino de Bicicleta, fábricas de bicicleta tradicionais adquirem os componentes de empresas terceiras, realizando sobretudo atividades de soldagem e usinagem de furos e roscas para encaixe das peças.

### 5.3.1.1 Impressora 3D - para Design

Para o design da peça é essencial possuir computadores munidos com softwares de desenho e uma impressora 3D simples para o desenvolvimento de protótipos. A função desta impressora é a fabricação de protótipos, para avaliações de parâmetros e outros testes, das peças que serão fabricadas posteriormente.

Foram identificadas e selecionadas para avaliação três modelos básicos de máquinas de impressão 3D, utilizados na transformação de ideias em objetos físicos. Devido às limitações de precisão, acabamento e material impostas pela tecnologia utilizada, estes objetos dificilmente configuram produtos finais e, como consequência, essas máquinas possuem preços mais acessíveis.

Os modelos de impressoras 3D selecionadas atendem ao pré-requisito de volume de impressão superior ao tamanho médio de um pedal de bicicleta (85mm de comprimento e 65mm de largura).

Tabela 5-7 - Quadro-resumo das impressoras 3D para design

<b>Impressora</b>	<b>Informações técnicas básicas</b>	<b>Preço</b>
RapMan 3.2 <sup>1</sup>	<i>Volume de impressão:</i> 270 x 205 x 210 mm <i>Tecnologia:</i> FDM <i>Material:</i> ABS e PLA <i>Compatibilidade de arquivos:</i> STL <i>Precisão:</i> 0,01mm <i>Resolução:</i> 0,125mm	R\$5.990,00
3DTouchTM <sup>2</sup>	<i>Volume de impressão:</i> 275 x 275 x 210 mm <i>Tecnologia:</i> FDM <i>Materiais:</i> ABS e PLA <i>Compatibilidade de arquivos:</i> STL <i>Precisão:</i> 0,06mm <i>Resolução:</i> 0,125mm	R\$13.990,00
CubePro <sup>3</sup>	<i>Volume de impressão:</i> 285,4 x 230 x 270,4 mm <i>Tecnologia:</i> FDM <i>Materiais:</i> ABS, PLA e Nylon <i>Compatibilidade de arquivos:</i> <i>Precisão:</i> 0,05mm <i>Resolução:</i> 0,100mm	R\$18.690,00

Fonte: Fichas de especificações técnicas das impressoras 3D

<sup>1</sup> Informações técnicas obtidas no site da Robtec e preço publicado pelo R7.

<sup>2</sup> Informações técnicas obtidas no site Robtec e preço publicado pelo R7.

<sup>3</sup> Cotação e informações técnicas obtidas no site da 3D Systems.

Para a seleção do modelo de impressora 3D mais adequado aos propósitos do design de produto, utilizamos o método de decisão multicritério AHP, adotando como critérios:

- Resolução
- Precisão
- Volume de impressão
- Preço

As notas comparativas atribuídas aos critérios, segundo a escala de importância relativa de Saaty (1980), assim como os pesos finais, estão apresentados na Tabela 5-8.

Tabela 5-8 - Cálculo do vetor de Eigen para as impressoras 3D para design

	<b>Resolução</b>	<b>Precisão</b>	<b>Volume de impressão</b>	<b>Preço</b>	<b>Vetor de Eigen</b>
<b>Resolução</b>	1	3	9	5	0,57
<b>Precisão</b>	1/3	1	7	2	0,25
<b>Volume de impressão</b>	1/9	1/7	1	1/5	0,04
<b>Preço</b>	1/5	1/2	5	1	0,14
<b>Total</b>	1,64	4,64	22,00	8,20	1,00

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5-9 - Cálculo dos pesos para as impressoras 3D para design

<b>Resolução</b>				
	RapMan 3.2	3DTouchTM	CubePro	Peso
RapMan 3.2	1	1	1/5	0,14
3DTouchTM	1	1	1/5	0,14
CubePro	5	5	1	0,71
<b>Precisão</b>				
RapMan 3.2	1	7	5	0,72
3DTouchTM	1/7	1	1/3	0,08
CubePro	1/5	3	1	0,19
<b>Volume de impressão</b>				
RapMan 3.2	1	1/5	1/9	0,06
3DTouchTM	5	1	1/7	0,19
CubePro	9	7	1	0,75
<b>Preço</b>				
RapMan 3.2	1	9	9	0,79
3DTouchTM	1/9	1	3	0,14
CubePro	1/9	1/3	1	0,07

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5-10 - Resultado da seleção multicritério da impressora 3D para design

	<b>Pesos dos critérios</b>	RapMan 3.2	uPrint SE Plus	CubePro
Resolução	<b>0,57</b>	0,14	0,14	0,71
Precisão	<b>0,25</b>	0,72	0,08	0,19
Volume de impressão	<b>0,04</b>	0,06	0,19	0,75
Preço	<b>0,14</b>	0,79	0,14	0,07
Resultado		0,37	0,13	0,49

Fonte: Elaboração própria

Aplicando o método da seleção multicritério, a impressora selecionada para implantação na fábrica foi a CubePro.

### 5.3.1.2 Impressora 3D - para Fabricação

Diferentemente daquelas listadas no item 5.3.1.1, estas impressoras 3D possuem uma exigência maior em termos de precisão, acabamento e resistência dos materiais utilizados, sendo portanto mais caras.

Estas máquinas são utilizadas na fabricação de peças finais ou de moldes para peças que exijam grande precisão.

Tabela 5-11 - Quadro-resumo das impressoras 3D para fabricação

	<b>Especificações técnicas</b>	<b>Preço</b>
ProJet® 3500 HDMax <sup>4</sup>	<i>Volume da máquina:</i> 749 x 1194 x 1511 mm <i>Peso da máquina:</i> 323 kg <i>Volume de impressão:</i> 298 x 185 x 203 mm <i>Precisão:</i> 0,0020mm/mm <i>Resolução:</i> 0,016mm <i>Tecnologia:</i> MJP <i>Compatibilidade de arquivos:</i> STL e SLC <i>Sistemas operacionais:</i> Windows XP Professional, Windows Vista e Windows 7	US\$ 90.000

Continua

<sup>4</sup> Especificações técnicas obtidas no site da 3D Systems e preço, na TCT Magazine

## Conclusão

	<b>Especificações técnicas</b>	<b>Preço</b>
Fortus 450 mc <sup>5</sup>	<i>Volume da máquina:</i> 1295 x 902 x 1984 mm	US\$ 200.000
	<i>Peso da máquina:</i> 601 kg	
	<i>Volume de impressão:</i> 406 x 355 x 406 mm	
	<i>Precisão:</i> 0,0015 mm/mm	
	<i>Resolução:</i> 0,127mm	
	<i>Tecnologia:</i> FDM	
	<i>Compatibilidade de arquivos:</i> STL	
Projet® 6000 HD <sup>6</sup>	<i>Sistemas operacionais:</i> Microsoft Windows 8.1 e Windows, Microsoft Windows, Microsoft Windows Vista, Microsoft Windows Server 2008, Microsoft Windows Server	US\$172.100
	<i>Volume da máquina:</i> 787 x 737 x 1829 mm	
	<i>Peso da máquina:</i> 1134kg	
	<i>Volume de impressão:</i> 250 x 250 x 250 mm	
	<i>Precisão:</i> 0,0020mm/mm	
	<i>Resolução:</i> 0,125mm	
	<i>Tecnologia:</i> SLA	
<i>Compatibilidade de arquivos:</i> STL e SLC		
	<i>Sistemas operacionais:</i> Windows 7 e mais recentes	

Fonte: Fichas de especificações técnicas das impressoras 3D

Para a seleção do modelo de impressora 3D mais adequado para fabricação, utilizamos o método de decisão multicritério AHP, adotando os mesmos critérios utilizados para a impressora 3D de design.

Tabela 5-12 - Cálculo do vetor de Eigen para as impressoras 3D para fabricação

	<b>Resolução</b>	<b>Precisão</b>	<b>Volume de impressão</b>	<b>Preço</b>	<b>Vetor de Eigen</b>
Resolução	1	1/2	5	5	0,35
Precisão	2	1	7	3	0,47
Volume de impressão	1/5	1/7	0	1/3	0,04
Preço	1/5	1/3	3	1	0,13
Total	3,40	1,98	15,01	9,33	1,00

Fonte: Elaboração própria

<sup>5</sup> Especificações técnicas obtidas no site da Stratasys e preço, na Aniwaa.

<sup>6</sup> Especificações técnicas obtidas no site da 3D Systems e preço, na BL 3Dimensions Corp

Tabela 5-13 - Cálculo dos pesos das impressoras 3D para fabricação

<b>Resolução</b>				
	ProJet® 3500	Fortus 450 mc	Projet® 6000 HD	Peso
ProJet® 3500	1	9	9	0,81
Fortus 450 mc	1/9	1	1/2	0,07
Projet® 6000 HD	1/9	2	1	0,12
<b>Precisão</b>				
ProJet® 3500	1	1/5	1	0,14
Fortus 450 mc	5	1	5	0,71
Projet® 6000 HD	1	1/5	1	0,14
<b>Volume de impressão</b>				
ProJet® 3500	1	1/5	1/3	0,10
Fortus 450 mc	5	1	5	0,69
Projet® 6000 HD	3	1/5	1	0,21
<b>Preço</b>				
ProJet® 3500	1	9	7	0,78
Fortus 450 mc	1/9	1	1/3	0,07
Projet® 6000 HD	1/7	3	1	0,15

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5-14 - Resultado da seleção multicritério da impressora 3D para fabricação

	<b>Pesos dos critérios</b>	ProJet® 3500	Fortus 450 mc	Projet® 6000 HD
Resolução	<b>0,35</b>	0,81	0,71	0,12
Precisão	<b>0,47</b>	0,14	0,07	0,14
Volume de impressão	<b>0,04</b>	0,10	0,69	0,21
Preço	<b>0,13</b>	0,78	0,07	0,15
Resultado		0,45	0,32	0,14

Fonte: Elaboração própria

A impressora 3D escolhida, com base na seleção multicritério foi a ProJet® 3500.

### 5.3.1.3 Centro de Usinagem CNC Compacto de Bancada

Em conformidade com os objetivos de desenvolver uma fábrica de ensino flexível e compacta, optamos por um modelo de Centro de Usinagem didático e compacto. As especificações do modelo, obtidas pela revendedora Didatech, estão apresentadas a seguir.

Figura 5-5 - Centro de usinagem DT-MN001 – EMCO Concept Mill 55<sup>7</sup>



Fonte: Didatech

- Curso nos eixos X, Y e Z: 190 x 140 x 260mm.
- Velocidade do fuso (infinitamente variável): 100 - 3.500 rpm.
- Fuso de alta velocidade (opcional) para 17.500 rpm.
- Avanço rápido nos eixos X, Y e Z: 2 m/min.
- Trocador de ferramenta de 8 posições.
- Automação (opcional).
- Morsa eletromecânica.
- Abertura automática da porta.
- Integração em sistemas FMS/CIM através de interface DNC e Robótica.
- Preço: R\$215.102,00

#### 5.3.1.4 Torno CNC de Bancada

Assim como na escola do centro de usinagem, optamos por um modelo de torno CNC compacto, revendido pela Didatech.

---

<sup>7</sup> Cotação e informações técnicas fornecidas pela Didatech.

Figura 5-6 - Torno DT-MN002 – EMCO Concept Turn 60<sup>8</sup>

Fonte: Didatech

- Tamanho máximo da peça de trabalho: 60 x 215 mm.
- Velocidade do fuso (infinitamente variável): 300- 4.200 rpm.
- Avanço rápido nos eixos X e Z: 2 m/min.
- Torre porta ferramentas de 8 posições.
- Automação (opcional).
- Placa pneumática de três castanhas.
- Contra-ponto eletromecânico.
- Abertura automática da porta.
- Integração em sistemas FMS/CIM através interface DNC e Robótica.
- Preço: R\$198.147,00

#### 5.3.1.5 Máquina de Solda

Segundo Pequini (2000), a solda MIG é o tipo de solda mais limpa, de realização mais rápida e mais barata, sendo utilizada na montagem da maioria das bicicletas comuns.

- 10% do ciclo a 110A e 60% a 55A
- Não precisa de gás
- Tensão: 220v 60Hz
- Peso: 16 Kg

---

<sup>8</sup> Cotação e informações técnicas fornecidas pela Didatech.

Figura 5-7 - Máquina de solda MIGFACIL145-220V<sup>9</sup>



Fonte: Ferramentas Kennedy

- Acessórios: Martelo escova, Máscara, Ponteiros de solda, Grampo Terra, Arame de solda
- Solda chapas de até 3 mm.
- Regulagem de velocidade do arame no painel da máquina
- Preço: R\$ 400,00

### 5.3.2 Equipamentos eletrônicos

Com os avanços das novas tecnologias e a evolução dos CPS, surge um interesse cada vez maior em dominar tecnologias eletrônicas para a desenvolvimento de produtos cada vez mais inteligentes e integrados.

Neste item, identificamos os equipamentos eletrônicos que podem ser utilizados por leigos, no ambiente da Fábrica POLI, para desenvolvimento de novos produtos ou novos processos, possibilitando a imersão em novas tecnologias.

#### 5.3.2.1 Arduino

O Arduino é uma plataforma de *hardware open source*, de fácil utilização, ideal para a criação de dispositivos que permitam interação com o ambiente, dispositivos estes que utilizem como entrada sensores de temperatura, luz, som etc., e como saída LEDs, motores, displays, auto-falantes etc., criando desta forma possibilidades ilimitadas (SOUZA *et al.*, 2011)

---

<sup>9</sup> Especificações técnicas e preço obtidos no site da Ferramentas Kennedy.

Segundo Souza *et al.* (2011), a plataforma utiliza-se de uma camisa simples de software implementada na placa e uma interface amigável no computador que utiliza linguagem C/C<sup>++</sup>. Existem, para este ambiente de desenvolvimento, bibliotecas que permitem a criação de interfaces com outros *hardwares*, permitindo o desenvolvimento de aplicações em diferentes áreas.

Para promover a utilização de plataformas arduinos na Fábrica POLI, diferentes componentes são necessários. Por isso, sugerimos a compra de kits, como os apresentados na Tabela 5-15, com componentes básicos para o desenvolvimento de dispositivos com Arduino.

Tabela 5-15 - Detalhamento dos kits de Arduino

Componentes			Preço
<b>SuperKit com Arduino Uno Rev-3</b>	1 CD interativo	8 Chave Táctil	1 Módulo Relé
	Arduino Uno	25 Jumpers	1 Codificador
	1 Cabo USB	1 LDR	1 Buzzer
	1 Protoboard 830	2 Displays	1 Servo 9g
	Caixa organizadora	9 Capacitores	1 Plug Bateria
	16 LEDs	8 Transistores	1 Motor DC
	40 Resistores	1 Piezo	1 Regulador
	1 Potenciômetro	1 Emissor	1 Termistor NCT
		1 Receptor IR	
			R\$ 245,00
<b>SuperKit com Arduino Mega</b>	Os mesmos componentes do SuperKit com Arduino Uno Rev-3, substituindo o Arduino Uno pelo Arduino Mega 2560 Rev 3.		R\$ 329,00

Fonte: Lab de Garagem

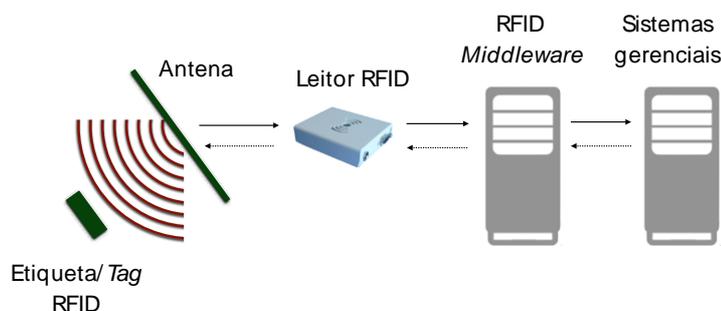
Como os dois tipos de Arduino apresentados possuem configurações diferentes, julgamos interessante a compra dos dois modelos para utilização na Fábrica POLI.

### 5.3.2.2 RFID

A tecnologia RFID é baseada na utilização de ondas eletromagnéticas (de rádio frequência) como meio para comunicar os dados de identificação de algum elemento, tais

como produtos, componentes, caixas, pallets, containers, veículos, pessoas, ativos, máquinas e serviços (PEDROSO, ZWICKER E SOUZA , 2009).

Figura 5-8 - Estrutura de funcionamento de um sistema RFID



Fonte: Adaptado de Pedroso, Zwicker e Souza (2009)

Os componentes essenciais para o desenvolvimento de sistemas RFID são, portanto, as etiquetas ou *tags* e os leitores. Na Tabela 5-16, são apresentados os modelos sugeridos desses componentes, com suas especificações e preços.

Tabela 5-16 - Quadro-resumo dos componentes essenciais para RFID

<b>Componentes</b>	<b>Especificações</b>	<b>Preço</b>
RFID adesivo	Frequência: 13.56 MHz Dimensões: 5cm*5cm Reprogramável	R\$9,00
RFID capsula de vidro	Frequência: 125 kHz Reprogramável	R\$28,50
Kit RFID cartões (2) e chaveiros (3)	Frequência: 125 kHz Dimensões: 5cm*5cm Reprogramável	R\$14,00
Leitor RFID ID-12LA	Alimentação: 2.8 - 5V Frequência de leitura: 125 kHz Range de Leitura: 120mm Dimensões: 25x26mm	R\$139,90
Leitor RFID ID-20LA	Alimentação 2.8 - 5V Frequência de leitura: 125 kHz Range de Leitura: 180mm Dimensões: 38x40x7mm	R\$166,50
<b>TOTAL</b>		<b>R\$ 357,90</b>

Fonte: Lab de Garagem

Os produtos apresentados, que são elementos básicos para projetos de iniciantes, podem ser adquiridos nos diferentes modelos a fim de aumentar a gama de soluções possíveis na fábrica.

### 5.3.3 Equipamentos de suporte

#### 5.3.3.1 Computadores

Os computadores da Fábrica POLI devem dar suporte tanto às impressoras 3D quanto às atividades de design do produto e preparação de conteúdo de apresentações ligadas aos projetos desenvolvidos.

Para fins de maior atualização e durabilidade, foram pré-selecionados os computadores mais bem avaliados, dentre aqueles com configurações mais modernas. Eles estão apresentados na Tabela 5-17.

Tabela 5-17 - Quadro-resumo dos computadores avaliados

<b>Modelo<sup>10</sup></b>	<b>Especificações e recursos</b>	<b>Preço</b>
Lenovo H50-30G-90AS0005BR	Tela: 19,5" Processador: Intel Core i3 Memória: 4GB HD: 1T Sistema operacional: Windows 8.1	R\$ 2.199,00
Computador/PC Dell Inspiron 3647	Tela: 18,5" Processador: Intel Core i5 Memória: 4GB HD: 1T Sistema operacional: Windows 8.1	R\$ 2.429,00
Computador All in One Dell Optiplex 3030	Tela: 19,5" Processador: Intel Core i3 Memória: 4GB HD: 500GB Sistema operacional: Windows 8.1	R\$ 2.609,00

Fonte: Elaboração própria

<sup>10</sup> As especificações e os preços de todos os modelos foram obtidos no site da Lojas Americanas

Devido à similaridade dos recursos apresentados e os preços acessíveis dos três modelos, o critério de qualificador da seleção foi o melhor processador do PC Dell Inspiration 3647.

### 5.3.3.2 Monitor/lousa digital

O monitor é um equipamento de suporte importante para a apresentação e compartilhamento de vídeos, dados e projetos, referentes às atividades realizadas no laboratório, aos frequentadores da fábrica. Alguns modelos de monitor interativo, dentre os quais selecionaremos o que será implantado na Fábrica POLI, estão apresentados na Tabela 5-18.

Tabela 5-18 - Quadro-resumo das lousas interativas avaliadas

<b>Modelo</b>	<b>Recursos</b>	<b>Preço</b>
Lousa Interativa Touchscreen 78" <sup>11</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite utilização simultânea de dois usuários</li> <li>• Dimensões : 1.58 m x 1.19 m / 78 polegadas</li> <li>• Capacidade de gravar toda ação feita pelo usuário, incluindo sua voz, em formatos de vídeo AVI e WMV</li> <li>• Interface intuitiva do software; bandeja de canetas, recursos de reconhecimento de toque</li> <li>• Possui player de vídeo, que permite fazer anotações sobre a tela de vídeo em exibição ou sobre imagens provenientes de câmeras, bem como a captura destas imagens</li> <li>• Preserva todo conteúdo estático em diversos formatos: PDF, HTML, PPT, GIF, BMP, PNG, JPG</li> </ul>	R\$2.899,00
Lousa Interativa porcelana magnética 78" <sup>12</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilização simultânea de dois usuários</li> <li>• Dimensões: 1692x1284x30 mm</li> <li>• Abre, modifica e salva arquivos em diferentes formatos</li> <li>• Multi touch, com comando ao toque dos dedos e reconhece qualquer ferramenta de escrita</li> <li>• Captura e salva as aulas, inclusive com áudio e vídeo</li> <li>• Navegação Internet e redes sociais</li> <li>• Desenho a mão livre e desenhos técnicos</li> <li>• Salva em formatos: JPG, HTML, TIFF, ODF, DOC, PNG, WMV, SWF, MPEG, MOV.</li> </ul>	R\$4.499,00

Fonte: Elaboração própria

<sup>11</sup> Especificações e preço obtidos no site da CompuJob

<sup>12</sup> Especificações e preço obtidos no site da Kalunga

Dada a equivalência quase completa dos recursos básicos apresentados pelos dois modelos levantados, o critério qualificador para a seleção do equipamento foi o preço. O modelo escolhido foi, portanto, a Lousa Interativa Touchscreen 78".

### 5.3.3.3 Bancadas e mesas

As bancadas servirão tanto como suporte dos equipamentos - impressoras 3D e computadores - quanto como espaço de trabalho manual de acabamento e montagem, utilizando-se das ferramentas apontadas anteriormente. As mesas de trabalho em grupo devem, por outro lado, reforçar a comunicação e a troca de informações entre os frequentadores da fábrica.

Retomando os conceitos de modularidade e flexibilidade, as bancadas e mesas utilizadas na Fábrica POLI devem ser facilmente movimentadas e adaptadas às mudanças na configuração da fábrica.

Na Tabela 5-19 estão apresentados alguns modelos de bancada de trabalho e modelos de mesas de reunião, dentre os quais selecionaremos aqueles que farão parte da infraestrutura da Fábrica POLI.

Tabela 5-19 - Quadro-resumo dos equipamentos de suporte avaliados

<b>Modelo</b>	<b>Características</b>	<b>Preço</b>
 <p>Mesa com rodízio<sup>13</sup></p>	<p>Dimensões de cotação:            Comprimento: 90 cm            Largura: 60 cm            Altura: 90 cm</p>	R\$400,00
 <p>Bancada com rodízio<sup>14</sup></p>	<p>Comprimento: 111 cm            Largura: 81 cm            Altura: 90 cm</p>	R\$593,00

Continua

<sup>13</sup> Especificações e preço obtidos no site da LeMOBi

<sup>14</sup> Especificações e preço obtidos no site da Loja do Mecânico

## Conclusão

Modelo	Características	Preço
Suporte anti-vibratório <sup>15</sup> 	Possui dispositivo de amortecimento regulável e indicador de nível. Dimensões: 40 x 40 x 3 cm	R\$525,00
Mesa componível <sup>16</sup> 	140 x 60 x 74 cm (cada) Tampo em MDP 18mm revestidos em melamínico	R\$327,00
Cadeira <sup>17</sup> 	Altura: 85cm Largura: 43cm Profundidade: 40cm Peso: 5,25kg	R\$80,99

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5-20 - Justificativa da escolha dos equipamentos de suporte

Função	Modelo escolhido	Justificativa
Suporte dos computadores e Impressoras 3D para design	Mesa com rodízio	Os computadores não necessitam de cuidado especial com vibração, mas exigem um suporte fixo para evitar deslizamentos.
Suporte de outras ferramentas	Bancada com rodízio	A facilidade da movimentação das ferramentas é importante para flexibilizar a configuração da fabricação.
Controle de qualidade e base das impressoras 3D	Base anti-vibratória	Em equipamentos de alta precisão, a vibração do suporte pode desregular os parâmetros da máquina.
Palestras e exposições	Mesas componíveis justapostas	A justaposição das mesas comportando grandes grupos facilita a troca de informações e estimula a participação em atividades expositivas.
Reuniões de equipes	Mesa componível	Com o trabalho de mais de uma equipe simultaneamente, é necessário disponibilizar espaço para trocas e reuniões intra-grupos.

Fonte: Elaboração própria

<sup>15</sup> Especificações e preço obtidos no site da SPLabor.

<sup>16</sup> Especificações e preço obtidos por orçamento Visual Móveis de Escritório

<sup>17</sup> Especificações e preço obtidos no site da Mobly

Da lista apresentada na Tabela 5-19, devem ser selecionados modelos de bancadas e mesas adaptadas às diferentes necessidades da Fábrica POLI. As características bastante específicas dos modelos listados são suficientes para orientar a escolha adequada à cada função. As necessidades e os modelos selecionados, assim como a justificativa para a escolha, são apresentados na Tabela 5-20.

### 5.3.4 Acessórios e consumíveis

#### 5.3.4.1 Softwares de modelagem

O software de modelagem escolhido para instalação na fábrica deve se comunicar facilmente com as impressoras 3D e permitir modelagem 3D detalhada e de alta qualidade.

Foram selecionados para comparação e posterior seleção os 4 *softwares* mais populares de desenho e modelagem para impressão 3D. Os detalhes dos *softwares* avaliados estão apresentados na Tabela 5-21.

Tabela 5-21 - Quadro-resumo dos *softwares* de modelagem 3D avaliados

<b>Softwares</b>	<b>Informações técnicas básicas</b>	<b>Preço</b>
Blender <sup>18</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Modelagem rápida:</i> atalhos e ferramentas personalizadas</li> <li>• <i>Interface flexível</i></li> <li>• <i>Principais formatos de importação/extração:</i> 3DS, DAE, FBX, DXF, OBJ, x, LWO, BVH, SVG, Stanford PLY, STL, VRML, VRML97</li> </ul>	Gratuito
SketchUP Pro <sup>19</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Modelagem precisa e com ferramentas variadas</i></li> <li>• <i>Possui um arquivo de modelos 3D gratuitos para utilização</i></li> <li>• <i>Interface amigável para iniciantes</i></li> <li>• <i>Principais formatos de importação/extração:</i> 3DS, 3D DWG, DXF, KMZ, FBX, OBJ, XSI, PDF or EPS, VRML, DXF, COLLADA (DAE)</li> </ul>	\$15/computador/ano (Licença educacional para laboratórios)

Continua

<sup>18</sup> Informações técnicas obtidas no site oficial do Blender.

<sup>19</sup> Informações técnicas obtidas no site oficial do SketchUP.

## Conclusão

<i>Softwares</i>	• <b>Informações técnicas básicas</b>	<b>Preço</b>
SolidWorks Student Edition <sup>20</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Facilidade na manipulação</i></li> <li>• <i>Principais formatos de importação/extração: 3MF, AMF, OBJ, STL</i></li> </ul>	\$149,95/computador /ano
AutoCAD <sup>21</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Ferramentas facilitadores de projeto</i></li> <li>• <i>Soluções de projeto conectado: desktop, nuvem e dispositivo móvel</i></li> <li>• <i>Principais formatos de importação/extração: DWF, DWFx, SAT, BMP, DWG, DXX, EPS, IGES, IGS, FBX, STL, WMF, DGN</i></li> </ul>	R\$1.106,60/mês R\$7.122,50/ano

Fonte: Elaboração própria

Considerando a equivalência dos recursos dos *softwares* apresentados, podemos propor que, na fase de lançamento da fábrica, utilizaremos o SketchUP Pro, que possui uma licença acessível e oferece serviços de manutenção não cobertos pelo software gratuito Blender.

#### 5.3.4.2 Materiais

Os materiais disponibilizados na Fábrica POLI incluem, além dos alimentadores das impressoras 3D, materiais de uso flexível para os diferentes projetos da fábrica.

Os materiais para a impressão são definidos segundo a escolha das impressoras 3D, nos itens 5.3.1.1 e 5.3.1.2. Os materiais disponíveis para cada uma das impressoras selecionadas estão apresentados na Tabela 5-22.

Os materiais de uso flexível possuem uma larga gama de aplicações e um custo mais baixo, por isso não terão os preços mapeados neste momento. São exemplos de materiais flexíveis: MDF, papel e papelão, borracha, silicone, entre outros.

<sup>20</sup> Informações técnicas obtidas no site oficial do SolidWorks.

<sup>21</sup> Informações técnicas obtidas no site oficial do AutoCAD.

Tabela 5-22 - Materiais de alimentação das impressoras selecionadas

<b>Impressora</b>	<b>Materiais</b>	<b>Preço</b>
CubePro	ABS	~R\$740,00/cartucho <sup>22</sup> (rende 13 a 14 impressões de objetos médios)
	PLA	
	Nylon	
	Material de suporte	
ProJet® 3500	Visijet® UV	~US\$650,00 (2kg de material) <sup>23</sup>

Fonte: Elaboração própria

<sup>22</sup> Preço obtido no site da 3D Systems

<sup>23</sup> Preço obtido no site da 3D Systems

## 6 INFRAESTRUTURA DA FÁBRICA POLI

A Fábrica POLI deve comportar, de modo geral, três tipos de atividades diferentes - atividades de design, de fabricação e de exposição/ensino - que devem estar alinhados à estrutura disponível e aos equipamentos levantados no item 5.

Na área de design, deve ser instalada a impressora 3D simples, além de computador(es) provido(s) de *softwares* de design e modelagem. Como equipamento suporte, são necessários mesa de trabalho em grupo e tela ou lousa interativa.

O setor de fabricação engloba todos os maquinários utilizados diretamente na produção final, como a impressora 3D profissional, o centro de usinagem CNC, o torno CNC, a máquina de solda MIG e os equipamentos eletrônicos.

Por fim, as atividades relacionadas ao ensino, como aulas, palestras e workshops, podem dividir espaço com a área de design, para utilização da tela interativa e das mesas de trabalho em grupo.

Nesta seção, à princípio, será feita uma análise da capacidade esperada da fábrica de ensino, seguida da seleção adequada, em termos de especificações e de quantidade, dos equipamentos listados anteriormente. Com estes resultados, será proposta a configuração física detalhada da Fábrica POLI.

### 6.1 Capacidade da fábrica

A avaliação da capacidade da fábrica se divide em duas etapas: a estimativa do número de frequentadores que a Fábrica POLI deve receber em cada uma das suas áreas e a quantidade de equipamentos a ser adquirida para atender essa demanda.

#### 6.1.1 Pessoal e usuários

Embora o número de frequentadores da Fábrica POLI seja variável, devido ao acesso público e não restrito às equipes docente e discente da Escola Politécnica, é necessário estimar o número de pessoas que a estrutura física deve comportar, para então propor as quantidades adequadas de equipamentos e ferramentas.

Além dos diferentes usuários do laboratório, com finalidades acadêmicas ou de aprimoramento industrial, e dos professores que desejarem utilizar o espaço para atividades práticas de suas disciplinas, o laboratório deve contar com apoio de monitor(es) especializado(s) para auxiliar no manejo dos equipamentos e *softwares*.

#### 6.1.1.1 Usuários

A Fábrica POLI deve estar aberta a todos os interessados em adquirir conhecimentos sobre novas tecnologias e processos, e trocar experiências sobre a indústria com acadêmicos, alunos e representantes industriais.

Esse contato com a Fábrica POLI poderá ser realizado através de palestras, workshops, agendamentos particulares e disciplinas de caráter teórico-prático. Tendo em vista a variabilidade da frequência de usuários nas três primeiras categorias de atividades, a estimativa da capacidade do laboratório será realizada com base no número de alunos que devem ser atendidos pelas disciplinas ministradas parcial ou totalmente no fábrica de ensino.

As disciplinas práticas em laboratórios da Escola Politécnica são ministradas a pequenos grupos, normalmente com atividades quinzenais, de modo a alinhar as aulas à infraestrutura do laboratório utilizado. Na Tabela 6-1, estão levantados o número médio de alunos por turma nos departamentos da Escola Politécnica com disciplinas que poderiam ser desenvolvidas parcial ou totalmente na Fábrica POLI (ver item 5.1.3), assim como o número proposto para turmas de laboratório com atividades quinzenais.

De modo a viabilizar o atendimento às disciplinas destes departamentos, fica estabelecido que a capacidade mínima de usuários do laboratório é de 20, que foi maior número de alunos por aula prática observado.

À esta capacidade mínima de usuários, será adicionado um professor responsável e o número adequado de monitores, de modo a definir a capacidade geral da Fábrica POLI.

Tabela 6-1 - Levantamento do número médio de alunos por GA

<b>GA</b>	<b>Departamentos</b>	<b>Número de alunos por aula teórica</b>	<b>Número de alunos por aula prática</b>
Civil e Ambiental	Hidráulica e Ambiental	30	-
	Hidráulica e Sanitária	50	-
	Transportes	70	-
Computação	Computação e Sistemas Digitais	30	18
	Sistemas Eletrônicos	60	20
Elétrica	Telecomunicações	60	18
	Mecânica	40	18
Mecânica	Mecatrônica	80	12
	Naval e Oceânica	70	15
	Produção	75	-
	Química	85	15
Química	Minas e Petróleo	40	20

Fonte: Lista de disciplinas do Júpiterweb

#### 6.1.1.2 Monitores

Tendo sido fixado o número mínimo de usuários em 20, podemos avaliar quantos monitores profissionais devem dar suporte às atividades da Fábrica POLI, e em quais áreas.

Os grupos de 20 usuários do laboratório serão idealmente divididos em diferentes equipes de trabalho, que podem alternar suas atividades entre as áreas de design e fabricação. Nestas áreas, podemos identificar a exigência de suporte em três categorias: *softwares* de modelagem e simulação, manipulação dos equipamentos de fabricação e manipulação dos equipamentos eletrônicos.

O suporte à utilização dos *softwares* de modelagem e simulação, assim como aos equipamentos de fabricação, que constituem o centro das atividades da fábrica, deve ser constante, durante todo o tempo de funcionamento da fábrica. Para este suporte, estimamos portanto a necessidade de dois monitores, de segunda a sexta, no horário de funcionamento da Fábrica POLI.

O desenvolvimento de produtos integrados a sistemas eletrônicos será possibilitado na Fábrica POLI, em menor demanda que as atividades de design e fabricação e, portanto, menor ênfase. Sem a necessidade da presença diária deste especialista no laboratório, podem ser

fixados dois horários semanais, aos quais os usuários interessados na utilização de equipamentos devem se adaptar para o desenvolvimento dos seus projetos.

Na Tabela 6-2 a seguir, estão propostos o perfil e a carga horária proposta para os monitores listados.

Tabela 6-2 - Perfil dos monitores requisitados

<b>Área</b>	<b>Perfil</b>	<b>Carga horária semanal</b>
Informática	Conhecimentos em <i>softwares</i> de modelagem e impressoras 3D	40h
Técnica	Conhecimentos em manipulação de centro de usinagem, torno e soldagem.	40h
Eletrônica	Conhecimentos em programação C/C++, Arduino e RFID	16h

Fonte: Elaboração própria

### **6.1.2 Equipamentos, acessórios e consumíveis**

Segundo o levantamento da capacidade em pessoas, a infraestrutura da Fábrica POLI deve atender a, pelo menos, 20 usuários, três monitores e um professor. A compra e disponibilização de equipamentos deve ser, portanto, dimensionada para uso de 24 pessoas.

#### **6.1.2.1 Equipamentos para design e fabricação**

Retomando as escolhas dos equipamentos do item 5.3.1, devemos definir em quais quantidades eles devem ser adquiridos, estimando o valor total da compra. Estas quantidades dependem do número de usuários da instalação, determinado no item 6.1.1, do valor dos equipamentos e do espaço físico utilizado.

As atividades de design e fabricação serão realizadas em grupos pequenos, que podem se alternar na utilização dos equipamentos mais caros e de grande porte, como a impressora 3D para fabricação, o centro de usinagem CNC, o torno CNC e a máquina de solda.

A impressora 3D para design pode ser adquirida em maior quantidade, pelo seu baixo custo e formato compacto. Estimando que o número máximo de usuários divida-se em grupos de 5-7 pessoas, pode-se propor a compra de uma máquina por equipe de trabalho.

Os kits de equipamentos eletrônicos podem ser fornecidos, na escala de um por equipe de trabalho. Estimando a utilização semanal da Fábrica POLI, por alunos de disciplinas práticas com frequência quinzenal, em 15 equipes (3 equipes por dia), pode-se propor a compra de 30 kits de Arduino (15 de cada modelo) e 30 kits de RFID.

A Tabela 6-3 a seguir apresenta um quadro-resumo das quantidades e valores de cada equipamento.

Tabela 6-3 - Definição das quantidades de equipamentos de design e fabricação

<b>Equipamentos</b>	<b>Modelo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Valor total</b>
Impressora 3D - para Design	CubePro	3	R\$56.070,00
Impressora 3D - para Fabricação	ProJet® 3500 HDMax	1	US\$90.000,00
Centro de usinagem CNC	DT-MN001 – EMCO Concept Mill 55	1	R\$215.102,00
Torno CNC	DT-MN002 – EMCO Concept Turn 60	1	R\$198.147,00
Máquina de solda	MIGFACIL 145-220 EASYMIG	1	R\$400,00
Equipamentos eletrônicos	Kit Arduino	30	R\$ 8.610,00
	Kit RFID	30	R\$9.870,00

Fonte: Elaboração própria

#### 6.1.2.2 Equipamentos de suporte

A quantidade de equipamentos de suporte, como computadores, monitores/lousa digital e bancadas, depende não só do número de usuários da fábrica, mas também da quantidade de equipamentos de design e fabricação determinada no item anterior.

Com relação ao número de computadores, é importante considerar seus diferentes usos dentro da Fábrica POLI:

- Criação de modelos e simulações através de *softwares*, cuja disponibilidade deve ser equivalente ou superior ao número médio de equipes de trabalho, geralmente três equipes ou quatro equipes.
- Interface com as impressoras 3D: cada uma das impressoras 3D deve estar conectada a um computador diferente, totalizando a necessidade de quatro computadores.

Utilizado em discussões de design e atividades de ensino, o monitor/tela interativa pode ser compartilhado entre essas atividades e, portanto, adquirido em uma só unidade.

A definição do número de mesas e bancadas depende da quantidade de equipamentos que precisam de suporte, assim como das atividades realizadas no laboratório. No item 5.3.3.3 foram selecionados diferentes tipos de suportes:

- Mesas com rodízio para suporte de computadores, impressoras 3D para design, acabamento manual, componentes eletrônicos e controle de qualidade. *Observação: a impressora 3D de precisão, o centro de usinagem e o torno já possuem suporte integrado.*
- Bancada com rodízio para armazenagem e transporte de outras ferramentas.
- Suporte anti-vibratório: para o controle de qualidade e suporte das impressoras 3D para design.
- Mesas componíveis para trabalhos em equipe ou atividades expositivas.

Tabela 6-4 - Definição da quantidade de equipamentos de suporte

<b>Equipamentos</b>	<b>Modelos</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Valor total</b>
Computadores		8	R\$19.360,00
Tela/lousa interativa		1	R\$2.899,00
Bancadas e mesas	Mesas com rodízio	14	R\$5.600,00
	Bancada com rodízio	2	R\$1.186,00
	Suporte anti-vibratório	4	R\$2.100,00
	Mesas componíveis	24	R\$7.848,00
Cadeiras		24	R\$1.943,76

Fonte: Elaboração própria

### 6.1.2.3 Acessórios e consumíveis

Entre os acessórios e consumíveis da fábrica, podemos citar os *softwares* de modelagem 3D e os materiais disponíveis para os projetos.

Enquanto o número de licenças adquiridas para o *software* depende diretamente do número de computadores, a quantidade de material comprado deve ser suficiente para garantir as atividades no primeiro mês da fábrica.

Sabendo que os cartuchos de impressão são capazes de produzir de 13 a 14 objetos médios, estimando a produção em 4 peças por dia, uma por impressora disponível, propomos a aquisição de 6 cartuchos de impressão.

Tabela 6-5 - Definição da quantidade dos acessórios e consumíveis

Consumível	Quantidade	Preço
Licença SketchUP Pro	8	US\$120,00
Cartucho CubePro	5	R\$3.700,00
Galão de VisiJet UV	1	US\$650,00

Fonte: Elaboração própria

## 6.2 Configuração da fábrica

Um dos resultados esperados no desenvolvimento de uma fábrica de ensino nos moldes da Indústria 4.0 é a concepção de um leiaute flexível. Para isso, utilizamos conceitos básicos da metodologia de Planejamento Sistemático de Layout (Systematic Layout Planning - SLP), proposta por Muther (1973), impondo requisitos de flexibilidade em cada etapa. Esta metodologia será aplicada para a área de fabricação.

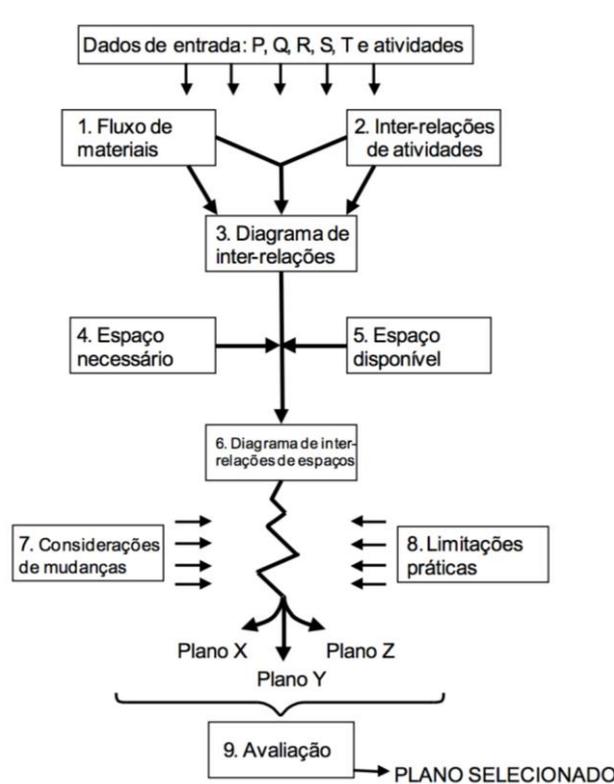
O modelo SLP segue as etapas apresentadas na Figura 6-1. Para a concepção do leiaute da Fábrica POLI, utilizamos as etapas mais aplicáveis a este projeto:

- Dados de entrada: definição da relevância e/ou possibilidade de mapeamento das informações sobre as atividades da fábrica;
- Inter-relações entre atividades: definição da necessidade de proximidade entre as áreas, através do diagrama de interligações preferenciais;

- Espaço necessário: cálculo da área ocupada por cada posto de trabalho, estimando a área total necessária;
- Limitações práticas;
- Leiaute proposto: proposição de um plano que respeite as restrições de proximidade e área definidos para cada posto de trabalho.

Para este projeto, não foram realizadas as etapas de definição do fluxo de materiais e de definição do espaço disponível. Os fluxos de materiais serão unitários e de peças pequenas, não influenciando na proposição do leiaute, que depende sobre tudo das inter-relações entre atividades; e o espaço disponível não é pré-definido, pois não faz parte do escopo deste projeto, cabendo ao levantamento das alternativas de instalação.

Figura 6-1 - Sistema de procedimentos SLP



Fonte: Muther (1973)

### **6.2.1 Dados de entrada**

Os dados de entrada, identificados na Figura 6-1 como "P, Q, R, S, T" referem-se ao produto, quantidade da produção, roteiro ou sequência do processo de produção, serviços de suporte e tempos envolvidos na produção.

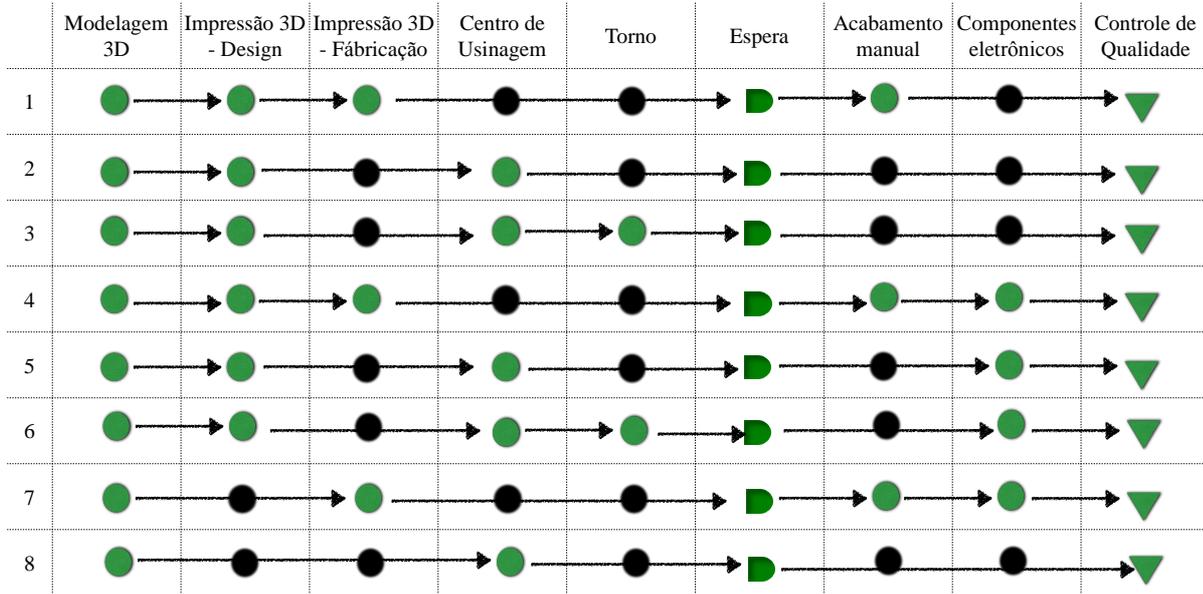
- O produto-exemplo definido para a Fábrica POLI é a bicicleta, da qual foi definido o componente a ser fabricado: o pedal.
- A produção deste componente é unitária, com enfoque em design e produção customizada.
- O roteiro do processo de produção é flexível e dependente das escolhas do projeto de cada pedal;
- Os serviços de suporte da fábrica de ensino envolvem mesas para discussão grupo, tela interativa para exposições e espaço para condução de aulas e palestras;
- Os tempos de produção, assim como o roteiro de fabricação, é bastante variável e flexível.

### **6.2.2 Inter-relações de atividades**

O fluxo de materiais, conforme citado no item anterior, é flexível e dependente do design do produto e dos processos de produção definidos para cada novo modelo. A fim de levantar o modelo que melhor atende aos requisitos desses fluxos flexíveis, mapeamos alguns fluxos representativos de material na Figura 6-2.

Com base na carta multi-processos apresentada na Figura 6-2, podemos priorizar as inter-relações entre as atividades. Para isso, propõe-se o diagrama de interligações preferenciais, apresentado na Figura 6-3, utilizando-se da escala de proximidade A (muito importante), E (importante), I (normal), O (desejável), U (sem importância) e X (indesejável).

Figura 6-2 - Carta multi-processos para fluxos-exemplo



Fonte: Elaboração própria

Figura 6-3 - Diagrama de interligações preferenciais,

	Modelagem 3D	Impressão 3D - Design	Impressão 3D - Fabricação	Centro de Usinagem	Torno	Espera	Acabamento manual	Componentes eletrônicos	Controle de Qualidade
Controle de Qualidade	U	X	X	X	X	U	A	E	
Componentes eletrônicos	U	U	U	U	U	U	A		
Acabamento manual	U	U	E	E	E	A			
Espera	U	U	A	A	A				
Torno	U	U	U	A					
Centro de Usinagem	A	E	E						
Impressão 3D - Fabricação	A	A							
Impressão 3D - Design	A								
Modelagem 3D									

Fonte: Elaboração própria

### 6.2.3 Espaço necessário

Antes de propor o leiaute, devem ser mapeadas as áreas necessárias para cada setor, incluindo a área efetivamente ocupada pelos equipamentos e a área ocupada pelo usuário, à

frente do equipamento. A área ocupada pelo usuário foi aproximada por uma seção retangular com comprimento equivalente ao ocupado pelo equipamento, e 1m de largura.

- Modelagem 3D: em 8 módulos, sendo 4 diretamente ligados às impressoras 3D, cada um com área equivalente à soma entre a área ocupada pelo usuário e a área ocupada pela mesa com rodízio, suporte dos computadores.
- Impressão 3D - Design: em 3 módulos, cada um com área equivalente à soma daquela ocupada por mesa com rodízio, suporte dos computadores, que serve de suporte para as impressoras 3D, e da área ocupada pelo usuário.
- Impressão 3D - Fabricação: 1 módulo, com área equivalente à área aproximada da máquina (1200 x 750 mm)
- Centro de Usinagem CNC: 1 módulo, com área equivalente à soma da área aproximada ocupada pela máquina (aproximadamente 1000 x 2000 mm) com a área ocupada pelo usuário.
- Torno CNC: 1 módulo, com área equivalente à soma da área aproximada ocupada pela máquina (aproximadamente 1000 x 2000 mm) com a área ocupada pelo usuário.
- Espera: 1 módulo, com área equivalente à soma da área ocupada por uma mesa com rodízio com a área ocupada pelo usuário.
- Acabamento manual: 1 módulo, com área equivalente à soma da área ocupada por uma mesa com rodízio com a área de trabalho.
- Componentes eletrônicos: 1 módulo, com área equivalente à soma da área ocupada por uma mesa com rodízio com a área de trabalho.
- Controle de Qualidade: 1 módulo, com área equivalente à soma da área ocupada por uma mesa com rodízio com a área de trabalho.

Tabela 6-6 - Levantamento da área ocupada pelos postos de trabalho

<b>Posto de trabalho</b>	<b>Quantidade de módulos</b>	<b>Perímetro do módulo</b>
Modelagem 3D	8	Equipamento: 0,9 x 0,6 m Usuário: 0,9 x 1,0 m Total: 0,9 x 1,6 m
Impressão 3D - Design	3	Equipamento: 0,9 x 0,6 m Usuário: 0,9 x 1,0 m Total: 0,9 x 1,6 m

Continua

## Conclusão

<b>Posto de trabalho</b>	<b>Quantidade de módulos</b>	<b>Perímetro do módulo</b>
Impressão 3D - Fabricação	1	Equipamento: 1,0 x 0,75 m Usuário: 1,0 x 1,0 m Total: 1,0 x 1,75 m
Centro de Usinagem CNC	1	Equipamento: 2,0 x 1,0 m Usuário: 2,0 x 1,0 m Total: 2,0 x 2,0 m
Torno CNC	1	Equipamento: 2,0 x 1,0 m Usuário: 2,0 x 1,0 m Total: 2,0 x 2,0 m
Espera	1	Equipamento: 0,9 x 0,6 m Usuário: 0,9 x 1,0 m Total: 0,9 x 1,6 m
Acabamento manual	1	Equipamento: 0,9 x 0,6 m Usuário: 0,9 x 1,0 m Total: 0,9 x 1,6 m
Componentes eletrônicos	1	Equipamento: 0,9 x 0,6 m Usuário: 0,9 x 1,0 m Total: 0,9 x 1,6 m
Controle de Qualidade	1	Equipamento: 0,9 x 0,6 m Usuário: 0,9 x 1,0 m Total: 0,9 x 1,6 m

Fonte: Especificações técnicas dos equipamentos de suporte

#### 6.2.4 Limitações práticas

Existem algumas limitações com relação à disposição dos módulos e a relação entre a área de design e fabricação, avaliada pela metodologia SLP, e a área voltada a reuniões, aulas e palestras, que será incluída ao leiaute final.

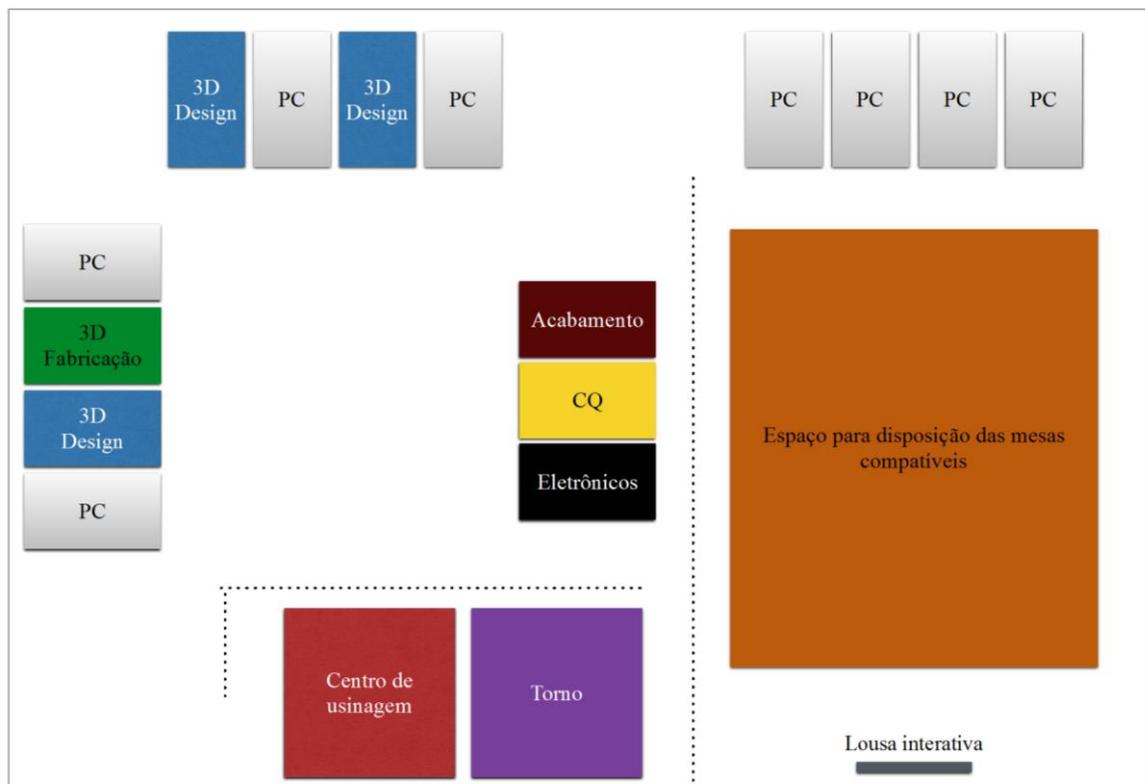
- O centro de usinagem e o torno, por produzirem ruídos mais fortes, devem ficar isolados acusticamente dos outros equipamentos;
- A área de ensino, voltada a reuniões de equipe, aulas e palestras, deve estar separada da área de fabricação, possibilitando a utilização das duas áreas simultaneamente, se necessário;
- A área de ensino deve ser parcialmente isolada da parte de fabricação, de modo que o fluxo de pessoas que queiram acessar a parte de fabricação atrapalhe o andamento das aulas, palestras e reuniões.

### 6.2.5 Leiaute proposto

Com base nas inter-relações das atividades, nas interligações preferenciais, e nas limitações práticas levantadas, podemos propor um leiaute simplificado para a Fábrica POLI.

O leiaute indicado está representado na Figura 6-4, com perímetro necessário estimado em 11 x 8 m, onde as linhas pontilhadas correspondem às divisórias de isolamento das áreas, conforme sugerido no item anterior.

Figura 6-4 - Proposição de leiaute simplificado da Fábrica POLI



Fonte: Elaboração própria



## **7 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS**

Embora a produção acadêmica sobre fábricas de ensino e Indústria 4.0 seja ainda restrita, devido à incipiência dos temas, a concepção, tanto no escopo conceitual quanto na infraestrutura da fábrica, alcançou resultados promissores, sobretudo graças ao direcionamento dado pelo levantamento das iniciativas e boas práticas relacionadas aos dois temas.

### **7.1 Resultados quantitativos e qualitativos**

Os temas de trabalho, as competências desenvolvidas, as possíveis disciplinas integradas e os equipamentos selecionados respondem adequadamente às expectativas depositadas em infraestruturas de ensino prático, como propomos para Fábrica POLI.

Enquanto as características impostas à fábrica quanto à flexibilização da produção, o conceito de produção unitária e customização e a utilização de novas tecnologias de produção, informação e comunicação, integram-se totalmente aos princípios da Indústria 4.0

Os principais resultados quantitativos deste projeto são as estimativas da área necessária para implementação da Fábrica POLI e do investimento necessário para a compra dos equipamentos para ela propostos.

A área de instalação mínima necessária é de 88m<sup>2</sup>, sujeita a mudanças posteriores ao detalhamento da configuração da fábrica na fase de implantação.

Os equipamentos propostos para instalação na Fábrica POLI totalizam, entre equipamentos de design, fabricação e suporte, aproximadamente, 890 mil reais, que podem ser adquiridos em etapas, segundo as prioridades, sendo que alguns dos equipamentos já estão disponíveis no InovaLab@POLI.

### **7.2 Próximos passos**

O presente trabalho de concepção detalhada da Fábrica POLI, uma fábrica de ensino nos moldes da Indústria 4.0 a ser instalada na Escola Politécnica, é essencial para que o

projeto obtenha financiamento e seja corretamente direcionado na fase de implantação. Deste modo, as próximas etapas de desenvolvimento da Fábrica POLI consistem em: submeter o projeto para demanda de financiamento e lançar a fase de implantação.

A fase de implantação da Fábrica POLI deve incluir: o detalhamento da arquitetura da fábrica; a definição do local de implantação e, conseqüentemente, das necessidades de reforma ou construção da estrutura da fábrica; o levantamento preciso dos custos de implantação e o planejamento geral da implantação e do lançamento da estrutura de ensino.

### **7.3 Conclusões pessoais**

Além dos conhecimentos adquiridos sobre o novo contexto industrial, suas realizações, seus desafios e, sobretudo, suas oportunidades, o presente trabalho reforçou à autora a importância de um ensino prático de engenharia, integrado à realidade da indústria mundial.

A criação de uma fábrica de ensino na Escola Politécnica da USP é um grande passo para o desenvolvimento dos profissionais de engenharia em paralelo aos avanços da indústria e, conseqüentemente, um aliado importante para recuperação da indústria do país.

## 8 BIBLIOGRAFIA

AGOSTINI, R. Indústria brasileira exporta mais por menos por causa dos preços menores. **Folha de São Paulo**, 22 de outubro de 2015.

AITENBICHLER, E. et al. Engineering intuitive and self-explanatory smart products. **Proceedings of the 2007 ACM symposium on Applied computing**, p. 1637, 2007.

ANGELI, M. **Curso de ciclismo desportivo**. Barcelona: Editorial de Venecchi, 1994.

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The Internet of Things: A survey. **Computer Networks**, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010.

BANDYOPADHYAY, D.; SEN, J. Internet of things: Applications and challenges in technology and standardization. **Wireless Personal Communications**, v. 58, n. 1, p. 49–69, 2011.

BLANCHET *et al.* INDUSTRY 4.0: The new industrial revolution How Europe will succeed. **Think Act**. Roland Berger: Munique, 2014.

BRETTEL, M. et al. How Virtualization , Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective. **International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering**, v. 8, n. 1, p. 37–44, 2014.

CACHAY, J. et al. Study on Action-Oriented Learning with a Learning Factory Approach. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 55, p. 1144–1153, 2012.

CACHAY, J.; ABELE, E. Developing Competencies for Continuous Improvement Processes on the Shop Floor through Learning Factories–Conceptual Design and Empirical Validation. **Procedia CIRP**, v. 3, p. 638–643, 2012.

CANO, W. A desindustrialização no Brasil. **Economia e Sociedade**, Campinas, v.21, número especial, p.831-851, dezembro de 2012.

CONNECT CYCLE. **Connect pedal**. Disponível em: <<http://connectedcycle.com>>. Acesso em 4 de setembro de 2015.

DELL’OLIO, L. et al. Modeling the Effects of Pro Bicycle Infrastructure and Policies Toward

Sustainable Urban Mobility. **Journal of Urban Planning and Development**, v. 140, n. 2, 2014.

DEPARTAMENTO DE ESTUDOS ECONÔMICOS (DEPECON). **Panorama da Indústria de Transformação Brasileira**. 7<sup>a</sup> edição, setembro de 2015.

DERLER, P.; LEE, E.; VINCENELLI, A. S. Modeling Cyber – Physical Systems. **Proceedings of IEEE**, v. 100:1, n. 1, p. 13–28, 2012.

DILLON, T. et al. Web-of-things framework for cyber–physical systems. **Concurrency and Computation: Practice and Experience**, v. 23, p. 905–923, 2010.

DURAY, R. et al. Approaches to mass customization: configurations and empirical validation. **Journal of Operations Management**, v. 18, n. 6, p. 1–2, 2000.

DUROC, Y.; KADDOUR, D. RFID potential impacts and future evolution for Green projects. **Energy Procedia**, v. 18, p. 91-98, 2012.

EDWARDS, M. et al. **Windsor iFactory demonstrates how Canada can compete in manufacturing**. 2014.

ELMARAGHY, H. et al. Product variety management. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 62, n. 2, p. 629–652, 2013.

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP. **Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI)**. Disponível em: < <http://www.lsi.usp.br/>>. Acesso em: 22 de agosto de 2015.

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP. **InovaLab@POLI**. Disponível em: < <http://sistemas-producao.net/inovalab/>>. Acesso em: 22 de agosto de 2015.

FITZGERALD, M. An Internet for Manufacturing. **MIT Technology Review**, 28 de janeiro de 2013.

GERMAN TRADE AND INVEST. **Industrie 4.0: Smart Manufacturing for the Future**. Berlim. p. 1-40, 2014

GÖSSLING, S.; CHOI, A. S. Transport transitions in Copenhagen: Comparing the cost of cars and bicycles. **Ecological Economics**, v. 113, p. 106–113, 2015.

GUBBI, J. et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future

directions. **Future Generation Computer Systems**, v. 29, n. 7, p. 1645–1660, 2013.

HSIAO, S.-W.; CHEN, R.-Q.; LENG, W.-L. Applying riding-posture optimization on bicycle frame design. **Applied Ergonomics**, v. 51, p. 69–79, 2015.

HONGKIAT. **10 Cool Biking Gadgets For The Avid Cyclist**. Disponível em: < <http://www.hongkiat.com/blog/gadgets-for-cyclists/>>. Acesso em 4 de setembro de 2015.

IFF, UNIVERSITÄT STUTTGART. **Lernfabrik für advanced Industrial Engineering**. Disponível em: < <http://lf.iff.uni-stuttgart.de>>. Acesso em 15 de agosto de 2015.

INMETRO. **Procedimento de fiscalização componentes de bicicleta de uso adulto**. Março de 2012.

IWB. **Ausstattung der Themengruppe Produktionsmanagement und Logistik**. Disponível em: < [http://www.iwb.tum.de/Ausstattung\\_Produktionsmanagement-p-19855575.html](http://www.iwb.tum.de/Ausstattung_Produktionsmanagement-p-19855575.html)>. Acesso em: 19 de setembro de 2015.

JIAO, J.; TSENG, M. M. Methodology of developing product family architecture for mass customization. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 10, n. 1, p. 3–20, 1999.

LEE, I.; LEE, K. The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. **Business Horizons**, v. 58, p. 431-440, 2015.

KAGERMANN, H.; WAHSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0**. Acatech, pp. 13–78, 2013.

KAGERMANN, H.; LUKAS, W.; WAHLSTER, W. *apud* HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. **Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review**. Technische Universität Dortmund, n. 1, 2015.

KALTENBRUNNER, A. et al. Urban cycles and mobility patterns: Exploring and predicting trends in a bicycle-based public transport system. **Pervasive and Mobile Computing**, v. 6, n. 4, p. 455–466, 2010.

KREIMEIER, D. et al. Holistic Learning Factories – A Concept to Train Lean Management, Resource Efficiency as Well as Management and Organization Improvement Skills. **Procedia CIRP**, v. 17, p. 184–188, 2014.

KYOUNG-DAE KIM; KUMAR, P. R. Cyber-Physical Systems: A Perspective at the

Centennial. **Proceedings of the IEEE**, v. 100, n. Special Centennial Issue, p. 1287–1308, 2012.

KUPER et al. Arbeitsplatznahe Betriebliche Lernformen. **Kompendium**. 2012. apud TISCH, M. et al. A Systematic Approach on Developing Action-oriented, Competency-based Learning Factories. **Procedia CIRP**, v. 7, p. 580–585, 2013.

LAMANCUSA, J.; JORGENSEN, J.; ZAYAS-CASTRO, J. The Learning Factory – A new approach to integrating design and manufacturing into the engineering curriculum. **Journal of Engineering Education**, v. 86(2), p. 103-112, abril de 1997.

LAMANCUSA, J. S. et al. The Learning Factory - Integrating design, manufacturing and business realities into engineering curricula - a sixth year report card. **International Conference on Engineering Education**, p. 1–6, 2001.

LAMANCUSA, J. S. et al. The Learning Factory: Industry-Partnered Active Learning. **Journal of Engineering Education**, n. January 2008, p. 7, 2008.

MATT, D. T.; RAUCH, E.; DALLASEGA, P. Mini-factory - A learning factory concept for students and small and medium sized enterprises. **Procedia CIRP**, v. 17, p. 178–183, 2014.

MICHE, M.; SCHREIBER, D.; HARTMANN, M. Core Services for Smart Products. **Architecture**, p. 1–4, 2009.

MIORANDI, D. et al. Internet of things: Vision, applications and research challenges. **Ad Hoc Networks**, v. 10, n. 7, p. 1497–1516, 2012.

MUTHER, R. **Systematic Layout Planning**. 2.ed. Boston: Cahnerns Books, 1973.

MTB BRASILIA. **Material derivado do grafite poderá revolucionar a fabricação de bicicletas**. 20 de fevereiro de 2015. Disponível em: <<http://mtbbrasil.com.br/2015/02/20/material-derivado-do-grafite-podera-revolucionar-a-fabricacao-de-bicicletas/>>. Acesso em: 28 de agosto de 2015.

NASSAR, V.; LUIZ, M.; VIEIRA, H. A aplicação de RFID na logística : um estudo de caso do Sistema de Infraestrutura e Monitoramento de Cargas do Estado de Santa Catarina. **Gestão & Produção**, v. 21, n. 3, p. 520–531, 2014.

ONUH, S. O.; YUSUF, Y. Y. Rapid Prototyping Technology : Applications and Benefits for

Rapid Product Development. **Journal for Intelligent Manufacturing**, v. 10, p. 301–311, 1999.

OROZCO *et al.* **PLM in a didactic environment: the path to smart factory**. 2015.

PEDROSO, M.; ZWICKER, R.; SOUZA, C. Adoção de RFID no Brasil: um estudo exploratório. **DE. Redalyc**. v. 10, p. 12–36, 2009.

PHAM, D. .; GAULT, R. . A comparison of rapid prototyping technologies. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 38, n. 10-11, p. 1257–1287, 1998.

PINE, B. Mass Customization: **The New Frontier in Business Competition**. Cambridge: Harvard Business School Press, 1993.

POOVENDRAN, R. Cyber-physical systems: Close encounters between two parallel worlds. **Proceedings of the IEEE**, v. 98, n. 8, p. 1363–1366, 2010.

RENISHAW. **First metal 3D printed bicycle frame manufactured by Renishaw for Empire Cycles**, 4 de fevereiro de 2014.

RIJSDIJK, S. A.; HULTINK, E. J. How today's consumers perceive tomorrow's smart products. **Journal of Product Innovation Management**, v. 26, n. 1, p. 24–42, 2009.

ROWTHORN, R.; RAMASWANY R. **Growth, Trade and Deindustrialization**. IMF Staff Papers, v. 46, n.1, 1999.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process**. New York: McGraw-Hill. 1980.

SEABRA, L.; TACO, W. **Mobilidade Urbana no Brasil: antecedentes e perspectivas à luz dos mecanismos de gestão**. 2013.

SCHUH, G. *et al.* Collaboration Mechanisms to Increase Productivity in the Context of Industrie 4.0. **Procedia CIRP**, v. 19, n. RoMaC, p. 51–56, 2014.

SCHUH, G. *et al.* Chapter 2: Hypotheses for a Theory of Production in the Context of Industrie 4.0. In: BRECHER, C. **Advances in Production Technology**. Aachen: Springer Open, 2015.

SEABRA, L. O. **Mobilidade Urbana no Brasil: antecedentes e perspectivas à luz dos mecanismos de gestão**. 2013.

SMITH, S. et al. Mass customization in the product life cycle. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 24, n. 5, p. 877–885, 2013.

SOUH, B. Influence of tire side forces on bicycle self-stability. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 29, n. 8, p. 3131–3140, 2015.

SOUZA, A. R. DE et al. A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 1, p. 01–05, 2011.

TISCH, M. et al. A Systematic Approach on Developing Action-oriented, Competency-based Learning Factories. **Procedia CIRP**, v. 7, p. 580–585, 2013.

TU DARMSTADT. **Process Learning Factory CiP**. Disponível em: <<http://www.prozesslernfabrik.de>>. Acesso em 15 de agosto de 2015.

ULIAN, F. **Crise da mobilidade urbana na cidade de São Paulo**. Percurso Acadêmico, Belo Horizonte, v. 3, n. 6, 2015.

ULRICH, K.; TUNG, K. Fundamentals of Product Modularity. **Issues in Design Manufacturing/Integration**. v. 39, p. 73–79, 1991.

UNIVERSITY OF WINDSOR, **Intelligent Manufacturing Systems (IMS) Centre**. Disponível em: <<http://www1.uwindsor.ca/imsc/laboratories>>. Acesso em: 15 de agosto de 2015.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE. **Futuros Ingenieros inventan dispositivos para los ciclistas urbanos**, 28 de novembro de 2014.

UPCRAFT, S.; FLETCHER, R. The rapid prototyping technologies. **Assembly Automation**, v. 23, n. 4, p. 318–330, 2003.

VDE Association for Electrical, Eletronic & Information Technologies. The german standardization Roadmap Industrie 4.0. **DKE Standardization Roadmap**, p. 1–60, 2014.

WAGNER, U. et al. The state-of-the-art and prospects of learning factories. **Procedia CIRP**, v. 3, n. 1, p. 109–114, 2012.

WAGNER, U. et al. Product Family Design for Changeable Learning Factories. **Procedia CIRP**, v. 17, p. 195–200, 2014.

WANG, R. Autos, transit and bicycles: Comparing the costs in large Chinese cities. **Transport Policy**, v. 18, n. 1, p. 139–146, 2011.

YAN, X.; GU, P. A review of rapid prototyping technologies and systems. **CAD Computer Aided Design**, v. 28, n. 4, p. 307–318, 1996.

ZORZI, M. et al. From today's intranet of things to a future internet of things: A wireless- and mobility-related view. **IEEE Wireless Communications**, dezembro de 2010.