

PROPOSTA DE TESTBED DE MANUFATURA AVANÇADA BASEADO EM LEAN MANUFACTURING E INDÚSTRIA 4.0

André José de Queiroz Padilha¹, João Carlos Duarte Caprera¹ e Ugo Ibusuki¹

¹Universidade Federal do ABC

E-mails: andrejpilha@gmail.com, jccaprera@gmail.com e ugo.ibusuki@ufabc.edu.br

RESUMO

O presente trabalho tem como foco a aplicação de conceitos de Lean Manufacturing por meio das tecnologias contidas no conceito “Indústria 4.0”, a criação de um layout de laboratório e procedimentos experimentais em um *testbed* a ser instalado na Universidade Federal do ABC. Através da associação de conceitos Lean principalmente vistos no Sistema Toyota de Produção com os conceitos de Sistemas Ciber-Físicos, foi possível indicar testes a serem realizados com equipamentos cotados. A escolha e disposição dos equipamentos no ambiente físico foi proposta para garantir a sua interconectividade de protocolos e conceitos estudados alinhada à necessidade de experimentação de conceitos da Indústria 4.0 sob a ótica da cultura Lean.

INTRODUÇÃO

A indústria de transformação ainda possui expressiva representatividade no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, compondo 11,3% de todo o PIB nacional em 2018 [1]. Aliado a isto a indústria de transformação está inserida em um ambiente de negócios cada vez mais competitivo, tendo que produzir soluções inovadoras, com menor tempo para que os produtos cheguem ao mercado, produtos cada vez mais complexos e com enorme variedade devido à tendência de customização em massa exigida pelos consumidores [2]. Isso tudo enquanto adaptam-se às novas tecnologias.

Revoluções tecnológicas, de uma visão do economista e do cientista social, possuem grande capacidade de criar riqueza na economia, abrindo grandes espaços de oportunidade de inovação e fornecendo um conjunto de tecnologias, infraestrutura e princípios organizacionais que podem melhorar o desempenho não só da indústria onde surgiu, mas de todas as indústrias e serviços, ou seja, revoluções tecnológicas criam novos paradigmas tecno-econômicos [3].

A construção da indústria de hoje passa pelo aumento da competitividade, através da redução de desperdícios, que é exatamente o objetivo dos sistemas de produção enxuta [4]. A Indústria 4.0 (I4.0) promete ser a próxima revolução, utilizando para isso muita tecnologia. É, portanto, necessário enxergar que novos espaços de oportunidade de inovação surgirão e que isso também será uma grande oportunidade de gerar riqueza na economia de um país como o Brasil.

Dessa maneira é necessário entender e estudar a Indústria 4.0 para ser capaz de implementá-la na indústria brasileira. Uma das maneiras de fazer isso é montar um pequeno laboratório de estudos que utilize as tecnologias da Indústria 4.0 com equipamentos de padrão industrial (um

testbed da Indústria 4.0). A partir disso, as perguntas que esse trabalho busca responder são: que tipo de *testbed* é possível montar com um investimento relativamente baixo? Quais testes poderiam ser executados neste *testbed* para mostrar a sinergia dos conceitos da manufatura enxuta e Indústria 4.0?

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Indústria 4.0

A evolução dos microcomputadores e sistemas embarcados e a alta conectividade entre eles [5] diminuíram e estão diminuindo cada vez mais as barreiras entre o mundo virtual e o mundo físico. Essa convergência dá origem aos Sistemas Ciber-físicos (*Cyber-Physical systems*, CPS) [6].

A utilização dos CPS na indústria, em conjunto com a mobilidade inteligente, logística inteligente, redes elétricas inteligentes, construções inteligentes e produtos inteligentes, conectados pela Internet das Coisas e Serviços é o que dá origem à I4.0 [6]. Dessa maneira é possível compreender que as ações que permitirão que a I4.0 exista não serão focadas apenas na indústria, e sim em um conjunto de outras áreas (1). É importante notar que o termo “Indústria 4.0” foi criado na Alemanha em 2011, porém existem outras iniciativas de outros países, como Estados Unidos e Coreia do Sul [7].



Figura 1: Alguns dos conceitos da Indústria 4.0.

Fonte: Kagermann, Wahlster e Helbig [6], traduzido pelos autores.

1.2 *Cyber-Physical Systems* (CPS)

Os CPS são sistemas de colaboração entre entidades computacionais e o mundo físico, que atingem também desde a entrada de insumos, almoxarifado, marketing, até a saída do produto final e os serviços [6]. Utilizando sensores, esses sistemas podem adquirir dados, processá-los e deixá-los disponíveis em serviços de rede globalmente. A integração de atuadores permite que respostas aos dados adicionados à rede também seja possível de ser realizada fisicamente [5].

Os CPS permitem o surgimento de inúmeras outras tecnologias, modelos de negócios e soluções para diferentes tipos de problemas [5][6].

O desenvolvimento dos CPS é potencializado por três fatores: sistemas embarcados inteligentes, negócios/empresas baseados na internet (utilizando por exemplo *Radio*

Frequency Identifier - RFID ou serviços do tipo *cloud computing*) e pelas redes sociais, que conecta os clientes diretamente aos fabricantes [5]. A arquitetura de um CPS pode ser dividida em alguns níveis [8], também descritos na Figura 2:

1. Conexão inteligente: utilização dos dados advindos dos sistemas internos da empresa (*i.e.*, ERP) ou de sensores. Importante possuir um protocolo de comunicação adequado e utilizar sensores confiáveis;
2. Conversão: é a conversão de dados para informação, consistindo em inferir informações dos dados brutos, localmente (*i.e.*, de máquina em máquina). Diversos algoritmos existem para tal objetivo, com um grande foco na confiabilidade das máquinas;
3. Cibernético: atua como um centralizador das informações, permitindo que outras informações sejam extraídas dos dados brutos, mas com o foco de comparar as máquinas entre si em tempo real e contra uma série histórica;
4. Cognição: consiste na apresentação das informações extraídas para os usuários, permitindo realizar decisões para priorizar certas ações e otimizar os processos já em andamento;
5. Configuração: no último nível as decisões tomadas no nível 4 são transmitidas, pelo nível 3, para todo o sistema produtivo, permitindo que ele se adapte e se reconfigure.

1.3 Implementando a Indústria 4.0

A implementação da I4.0 não é única para qualquer empresa. Uma vez que é um processo custoso, cabe a própria empresa decidir o equilíbrio entre nível de implementação e os recursos utilizados para tal [9].

Antes de descrever os estágios para implementação da I4.0, é necessário definir o que é um gêmeo digital. De acordo com Boschert & Rosen [10]

A visão do gêmeo digital refere-se à descrição funcional e física compreensível de um componente, produto ou sistema, que inclui mais ou menos todas as informações que poderiam ser úteis em todas as fases do ciclo de vida, tanto as atuais quanto as futuras.

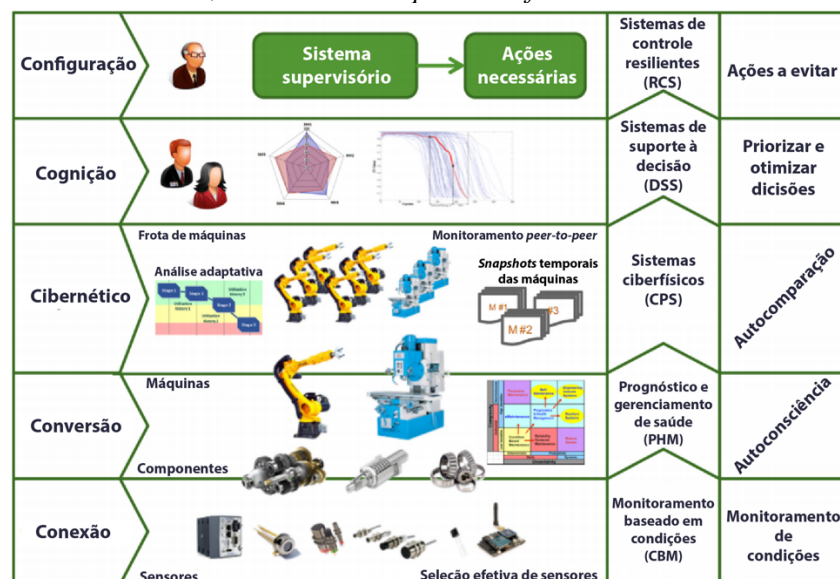


Figura 2: Arquitetura de um CPS.

Fonte: Lee, Bagheri e Kao [8], traduzido pelos autores.

Os seis estágios para implementação da I4.0, segundo estudo da Acatech [9], são listados e explicados a seguir:

1. Computadorização: o primeiro estágio já está bem avançado na maior parte das empresas. Consiste na utilização de tecnologias da informação de forma isolada para auxiliar na produção. Um exemplo são as máquinas CNC;
2. Conectividade: nesse estágio as tecnologias da informação que antes funcionavam de forma isolada agora possuem algum tipo de conexão. Um exemplo seria o departamento de engenharia conseguir enviar diretamente para a máquina CNC o projeto de um produto para a usinagem;
3. Visibilidade: a visibilidade consiste em coletar dados ao redor de toda a fábrica e mantê-los centralizados, possibilitando a criação do que é chamado de gêmeo digital da fábrica;
4. Transparência: esse estágio permite que a empresa entenda os dados coletados no estágio 3. Os inúmeros dados coletados dos mais variados sensores são tratados com diferentes métodos, como *Big Data* e permitem que a empresa tome medidas para corrigir problemas;
5. Capacidade preditiva: esse estágio consiste em avançar o gêmeo digital no tempo para prever o estado futuro da fábrica e tomar ações adequadas antecipadamente;
6. Adaptabilidade: o último estágio permite que as próprias tecnologias da informação tomem as ações necessárias para adequar-se da melhor maneira possível aos eventos capturados no estágio 5.

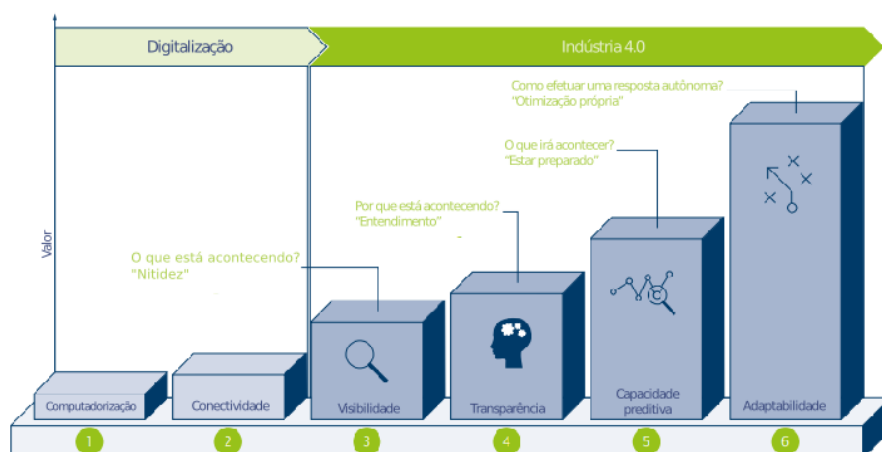


Figura 3: Estágios de implementação da Indústria 4.0.

Fonte: Industrie 4.0 Maturity Index (2017)[9], traduzido pelos autores.

1.4 Lean e Indústria 4.0

O sistema de produção enxuto e a I4.0 possuem muito potencial para atingir positivamente a indústria mundial. O primeiro já mostrou isso quando foi utilizado por exemplo na Toyota. Porém ainda é nebulosa a interação entre eles. As próximas referências foram pesquisadas para auxiliar no entendimento dessa interação, como pode ser proveitosa e quais dificuldades serão encontradas.

1.5 Pontos positivos e sinérgicos

Wagner, Herrmann e Thiede [11] apresentam os impactos positivos que as tecnologias trazidas pela I4.0 possuirão nos sistemas de produção enxutos a partir da opinião de 24 líderes em projetos de I4.0 de companhias automotivas. Os princípios enxutos que mais

sofrieriam um impacto seriam o *Kaizen*, nivelamento da produção, padronização, *takt time* e *Just-in-time (JIT)*. O JIT é estudado mais a fundo em um caso de uso, onde o CPS poderia substituir o *kanban* com a utilização de uma comunicação verticalizada entre todas as máquinas. Os materiais entregues seriam identificados com RFID, permitindo que fosse dada baixa automática do almoxarifado (ou do fornecedor). Uma análise é realizada para permitir a previsão de novos pedidos (o que ajuda na questão da estabilidade dos sistemas enxutos). O sistema possui autonomia para realizar novos pedidos quando necessário e toda a informação é disponibilizada para as pessoas certas da empresa.

Mrugalska e Wyrwicka [12] e Kolberg e Zühlke [13] mostram que os produtos inteligentes podem armazenar dados como as ações que sofreram ao longo do processo de produção, o que pode ser utilizado para mapear o processo (utilizado em *lean* como *Value Stream Mapping*), realizar melhoria contínua (*Kaizen*) no processo e substituir o *kanban*. Já as máquinas inteligentes podem: (a) utilizar a tecnologia RFID para ler os cartões *kanban* (ou o próprio produto, caso venha a substituir o primeiro), (b) armazenar dados para também realizar melhoria contínua, (c) introduzir o SMED (*Single Minute Exchange of Die*) em toda a fábrica a partir das máquinas que se tornam *Plug'n'Produce* (capazes de serem instaladas e iniciarem a produção de maneira rápida e simples) e (d) a partir dos CPS que possuem a característica *Plug'n'Produce* reduzir a chance de implementação de processos suscetíveis a falhas (*poka-yoke*). Os operadores poderão aproveitar outras tecnologias para receber informações importantes (*andon* individualizado) como os *smart watches* e a utilizar a realidade aumentada como suporte ao JIT na fábrica.

Kolberg e Zühlke [13] também apresentam as limitações que os sistemas de produção enxuto possuem: dependência de um processo com demanda estável, sistema não apropriado para produção de itens únicos e a própria idade do sistema, que não foi projetado para incorporar as novidades tecnológicas de hoje. Dessa maneira a automação enxuta possui o potencial de utilizar as tecnologias da I4.0. Os autores destacam que tanto os sistemas de produção enxuto quanto a I4.0 priorizam estruturas pequenas, de baixa complexidade e descentralizadas a estruturas grandes, complexas e centralizadas. As empresas que adotam o sistema de produção enxuto facilitam a introdução da I4.0, já que são organizadas de forma mais padronizada e transparente [13].

Sanders, Elangeswaran e Wulfsberg [14] apresentam as principais vantagens que os sistemas de produção enxutos possuem quando aplicados com as tecnologias da I4.0, a começar pelo *feedback* com os fornecedores. Na cadeia de suprimentos totalmente conectada, a informação entre as fábricas e seus diversos fornecedores será muito mais confiável, minimizando o desperdício causado por informações transmitidas de maneira errada. A IoT (*Internet of Things*) permitirá rastrear todos os produtos, diminuindo *lead times* e aumentando a confiabilidade logística. Além disso o desenvolvimento dos fornecedores será potencializado, já que os mesmos deverão se adaptar às novas tecnologias para poderem, por exemplo, se comunicar com seus clientes.

Os clientes também podem ser beneficiados com essa integração. O ponto de escolha dos parâmetros do seu produto poderá ser adiado ainda mais [14], assim o cliente poderá no meio do processo de produção do seu carro, antes do processo de pintura, trocar a cor que havia escolhido no ato da compra. O cliente também saberá exatamente como anda a produção do seu produto [14] e saber de eventuais atrasos de entrega. A integração de tecnologia nos produtos (produtos inteligentes) poderá ser utilizada para adquirir dados dos

clientes (a discussão sobre privacidade de dados não será levada em consideração neste trabalho) e então melhorar ainda mais as previsões de venda da empresa, aumentando a estabilidade do processo e favorecendo o sistema de produção enxuto.

Sanders, Elangeswaran e Wulfsberg [14] também discutem a possibilidade de substituição do *kanban* por um irmão digital. A Figura 4 apresenta a utilização desse *e-kanban* e outras soluções tecnológicas da I4.0 em um sistema de produção enxuto. Os autores também incluem a utilização das máquinas *Plug-n-Produce* para possibilitar a customização em massa, similar ao que a Toyota fez ao aplicar o SMED (em uma escala menor). Já os princípios do TPM (*Total Productive Maintenance*) são garantidos com a presença de máquinas que podem avisar as pessoas certas em caso de alguma falha ou manutenção que precise ser realizada; a máquina parada pode inclusive realocar as operações que seria realizada nela para outras máquinas de forma autônoma.

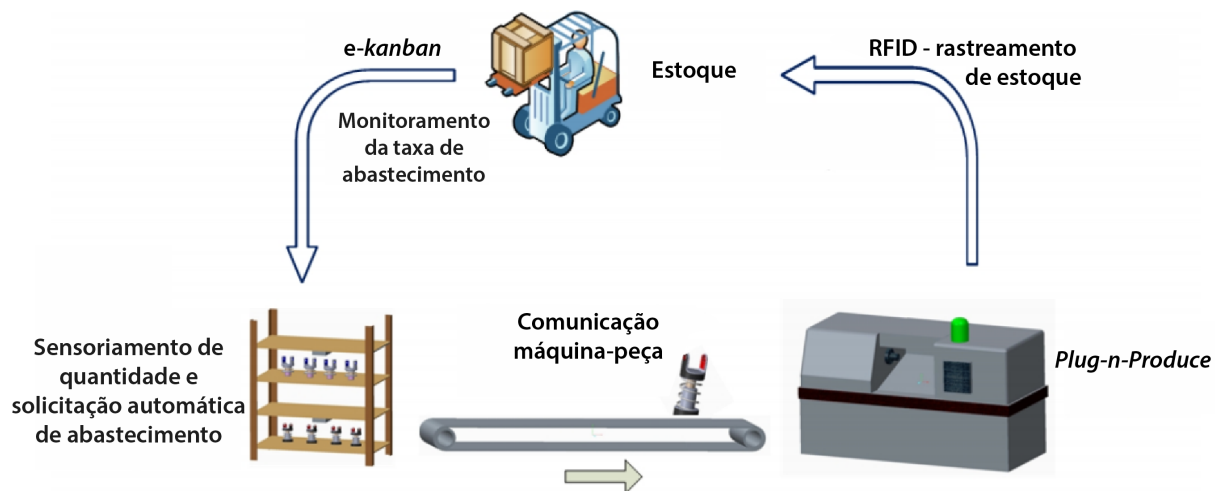


Figura 4: Tecnologias de auxílio aos sistemas de produção enxutos.
Fonte: Sanders, Elangeswaran e Wulfsberg [14], traduzido pelos autores.

Os processos estatísticos de controle também podem ser garantidos com a utilização dos produtos inteligentes e máquinas inteligentes [14], que poderão armazenar os dados de forma automática e realizar as análises necessárias do processo de produção.

A questão de envolvimento dos trabalhadores também é discutida em [14]. Os trabalhadores podem dar o feedback de suas operações e ideias de melhorias em tempo real para a gerência. A alocação de força de trabalho humana também será otimizada, aumentando o envolvimento dos colaboradores.

O *poka-yoke* pode ser implementado na I4.0 com o auxílio da realidade aumentada. Em [15] é possível verificar como um operador realiza operações de montagem com o auxílio de instruções que parecem “flutuar” ao seu redor. As peças necessárias são indicadas para montagem, incluindo o local e posição de montagem, assim como nos dispositivos *poka-yoke* físicos.

1.6 Dificuldades

Kolberg e Zühlke [13] discutem a necessidade de um *framework* para a correta integração entre os sistemas de produção enxutos e a I4.0. Esse *framework* deve conter as tecnologias da I4.0 que auxiliam um sistema de produção enxuto, além de mostrar como integrar isso

em sistemas já existentes. Além disso também é necessário um *framework* para os *softwares* utilizados nos CPS.

Rüttimann e Stöckli [16] refletem que antes de qualquer integração entre os sistemas de produção enxutos e a I4.0, os dois devem ser muito bem entendidos. Os autores discutem que uma das maiores dificuldades encontradas pelos engenheiros que trabalharão com I4.0 será otimizar diferentes critérios de desempenho do sistema produtivo (*lead time*, capacidade e *on time delivery* por exemplo) com as restrições financeiras de cada empresa. O sucesso da implementação da I4.0 depende da correta aplicação da mesma em uma determinada área. Dessa maneira, recomendam que primeiro se aplique o sistema de produção enxuto ao invés de esperar que as transformações da I4.0 realmente ocorram.

2. ESTUDO DE CASO E DISCUSSÃO

2.1. Visita em campo

Com o intuito de coletar informações que pudessem auxiliar no projeto do laboratório, foram realizadas, em 3 de outubro de 2018, duas visitas a instalações fabris de empresas que estão na vanguarda do campo de I4.0 e Manufatura Enxuta (DENSO Brasil na cidade de Santa Bárbara D'Oeste e da BOSCH Rexroth na cidade de Atibaia). O objetivo específico dessas visitas foi entender sobre as atuais tecnologias, *software*, *hardware*, dispositivos, máquinas e até procedimentos que poderiam ser utilizados na implementação do laboratório.

A fábrica da DENSO Brasil produz sistemas de ar-condicionado, entre outros. A fábrica surpreendeu no aspecto de uso de sistemas *karakuri* nas instalações de suas linhas de produção. A alta customização do equipamento modular apresentou adaptabilidade às necessidades distintas, desde o processo de reposição de Matéria-Prima (MP) até armazenamento de produto final. A fabricante STH foi conhecida através dessa visita e foi uma das empresas fornecedoras de equipamentos escolhida.

Além disso a fábrica é gerida totalmente por conceitos enxutos. Os equipamentos são preparados para realizar a troca rápida de ferramentas. A presença dos *andons* também foi identificada em praticamente todos os postos de trabalho, caracterizando a gestão visual. O ambiente de manufatura é muito organizado, muito limpo, bem iluminado e com as ferramentas em locais próprios e organizados, que são as características do 5S. Foi identificada também a presença de diversos dispositivos *poka-yoke*. A fábrica funciona no sistema puxado, utilizando a reposição de estoque JIT.

Há áreas de controle de qualidade das peças produzidas que utilizam o controle estatístico de processo. Além disso existe um controle do processo produtivo, medindo por exemplo a produtividade, tempos de parada, *setup*, quebra de máquinas e acidentes. Todas essas métricas possuem metas de melhorias constantes.

Os postos de trabalho possuem indicações claras sobre o *takt time*, e cada um dos operadores são avaliados baseados, entre outros, no tempo de ciclo ser menor que o *takt time*. Os operadores que não atendem o *takt time* são orientados e treinados, muitas vezes na própria linha de produção.

Os principais conceitos e tecnologias identificados nesta visita que possuem possibilidade de serem utilizados no *testbed* são os seguintes: *karakuri*, gestão visual, 5S, *poka-yoke*, controle de qualidade e *just-in-time*.

A Bosch Rexroth atua no Brasil no segmento de consultoria técnica a empresas que necessitam de projetos específicos de monitoramento de seus equipamentos de maneira a coletar dados de seu ambiente produtivo. A visita às suas instalações permitiu identificar as tecnologias que são usadas no cenário internacional e assim se mostrou potencial fornecedor de equipamentos de sensoriamento.

Dentre as tecnologias apresentadas destacam-se (1) diferentes tipos de sensores (temperatura, som, acelerômetro, umidade, intensidade luminosa) integrados em um único produto (*Bosch XDK*) com integração e programação simples, (2) o uso de óculos de realidade virtual para funcionarem como dispositivos *poka-yoke* virtuais, (3) uso de chips RFID nos produtos para que o próprio sistema produtivo realize decisões de nível operacional e atualize o ERP e também para eliminação dos *kanbans* físicos, (4) integração da cadeia produtiva por meio de sistemas na nuvem, (5) uso de interfaces humano máquina para acompanhar a produção e realizar reuniões no chão de fábrica (*Bosch ActiveCockpit*), (6) criação de gêmeos digitais para simulação de diferentes cenários futuros.

2.2. Laboratório

Um diagrama do laboratório foi criado, indicando quais equipamentos seriam utilizados, como seriam integrados e pode ser visto na Figura .

Para o uso dos equipamentos inseridos no *testbed*, o robô colaborativo será responsável pela movimentação da peça sendo manufaturada nas máquinas de manufatura aditiva. O sistema RFID cumpre o propósito de identificação e rastreamento das peças manufaturadas, dado a ausência de usuário operando a manufatura. O sistema de câmeras soluciona o problema ausência/presença, cor e medição, aplicado ao contexto da manufatura avançada, com a ajuda de softwares específicos. O CLP será responsável por toda automação do *testbed*, integrando os sistemas RFID, de visão, sensores e atuadores. O uso da bancada metrológica se dá pela necessidade de que não haja desequilíbrio ou movimentações durante o processo de medição, garantindo a estabilidade.

O sistema *Karakuri*, é usado em aplicações de movimentação de MP ou produto final em uma célula produtiva ou linha. Com a capacidade de viabilizar transporte com o mínimo de esforço feito pelo usuário, é um sistema simplista e com resultados práticos que podem viabilizar a operação do *testbed*.

A Tabela 1 apresenta a lista dos equipamentos selecionados para serem adquiridos e utilizados no laboratório.

Tabela 1: Equipamentos que deverão estar presentes no laboratório.

Equipamento	Fornecedor	Descrição resumida
Sistema <i>karakuri</i>	STH Representações	Em perfil tubular de alumínio Ø28
Bancada metrológica	Tecnoferramentas COM, IMP e EXP LTDA	Desempeno de Granito 1000x630 mm Digimess e suporte para desempenho
Máquinas de manufatura aditiva	ParticipAtiva	Zmorph Single VX, Impressora 3D DLP Moonray S, Fotopolimerizadora, Limpador Ultrassônico
CLP, sensor de visão e sensor RFID	Siemens Ltda.	Interface homem-máquina, fonte, I/O digital e analógico, leitor RFID, , sistema de visão, computador industrial e licença de uso
Robô colaborativo	Ladder Automação Industrial LTDA.	Braço Robótico Colaborativo Universal Robots (UR3)
Sensor	Rexroth - Bosch Company	XDK 110 Cross Domain Development Kit

2.3. Layout

Os autores levantaram a possibilidade de instalar o *testbed* no laboratório L404, no Bloco L do campus Santo André da UFABC. As medidas do laboratório foram coletadas no dia 28/11/2018 e reproduzidas em 3D utilizando o software Sketchup (versão 19.1.174 64-bit). A Figura apresenta o atual *layout* da sala em questão.

O projeto elétrico do laboratório também foi consultado para auxiliar no *layout* das máquinas e equipamentos. O laboratório possui diversos circuitos de 20 amperes, divididos usualmente em duas tomadas de 10 amperes cada, todas de 110V, exceto duas tomadas de 220V.

O posicionamento da máquina de manufatura aditiva por sinterização a laser foi o principal fator para a escolha do layout, já que essas máquinas possuem uma potência maior que a dos outros equipamentos e por isso deve ser utilizada individualmente em um circuito de 110V (20A) ou então em um circuito de 220V. O único posicionamento encontrado é o indicado na Figura , pois o posicionamento próximo do outro circuito de 220V acabaria bloqueando a passagem de pessoas no laboratório.

A utilização do software SCADA da Siemens será utilizado para realizar a integração do módulo de PLC e IHM, enquanto o MES será usado para ordenação e otimização da produção conforme a disposição e configuração dos testes explicados a seguir. Referenciando a geração de gêmeo digital, o Process Simulation da Siemens tem papel importante na caracterização do produto a ser fabricado.

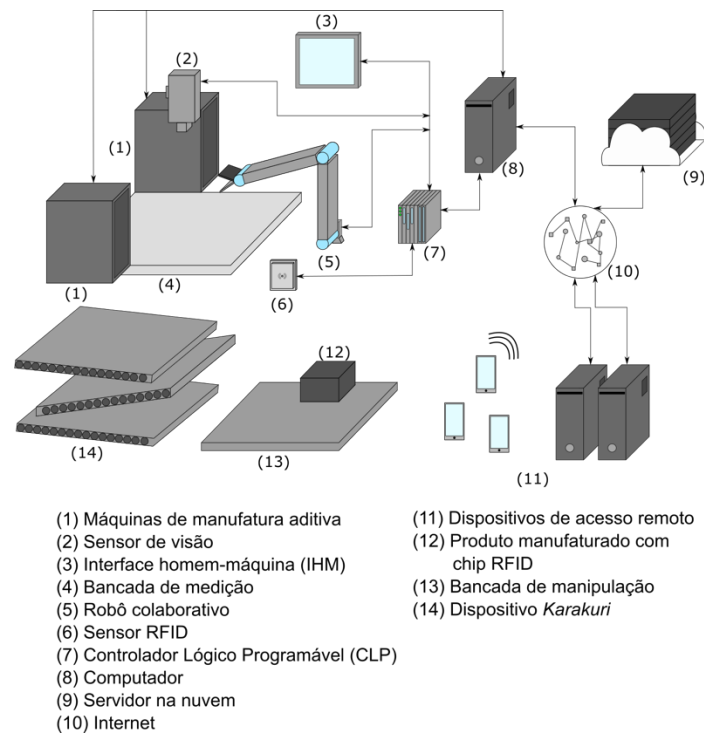


Figura 2: Sistema de manufatura proposto e lista de componentes.
 Fonte: Os autores.

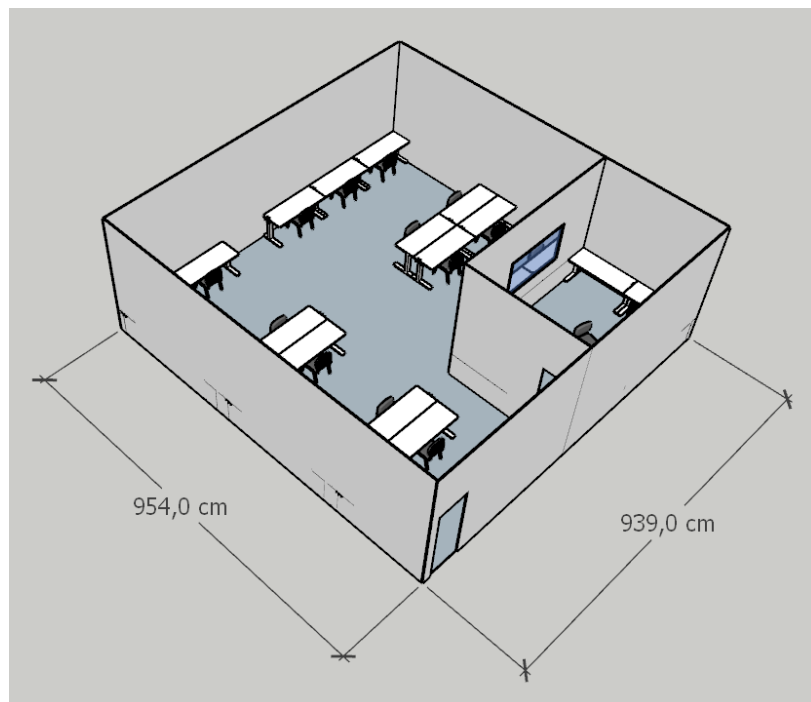


Figura 6: Medidas do laboratório L404, em Santo André.
 Fonte: Os autores.

A Figura , Figura e Figura apresentam o posicionamento dos equipamentos dentro do laboratório considerando a limitação da máquina de manufatura aditiva, otimizando o espaço e diminuindo movimentações desnecessárias.

A Figura 30 apresenta o fluxo de materiais no *testbed*. Em (1) a matéria-prima chega e é posicionado adequadamente nas máquinas de manufatura aditiva, que iniciam a produção (2). Após o fim da impressão, o braço robótico posiciona o produto na bancada de medição (3), onde é realizada a medição pelo sistema de visão (4). O braço robótico então retira a peça da bancada de medição e posiciona no dispositivo *karakuri* (5). O material é então retirado do *testbed* em (6) por um colaborador.

Nas etapas 1 e 6 a antena RFID poderá ser utilizada para identificar que um certo tipo de matéria-prima chegou ao sistema produtivo ou então que um certo produto está saindo do sistema produtivo.

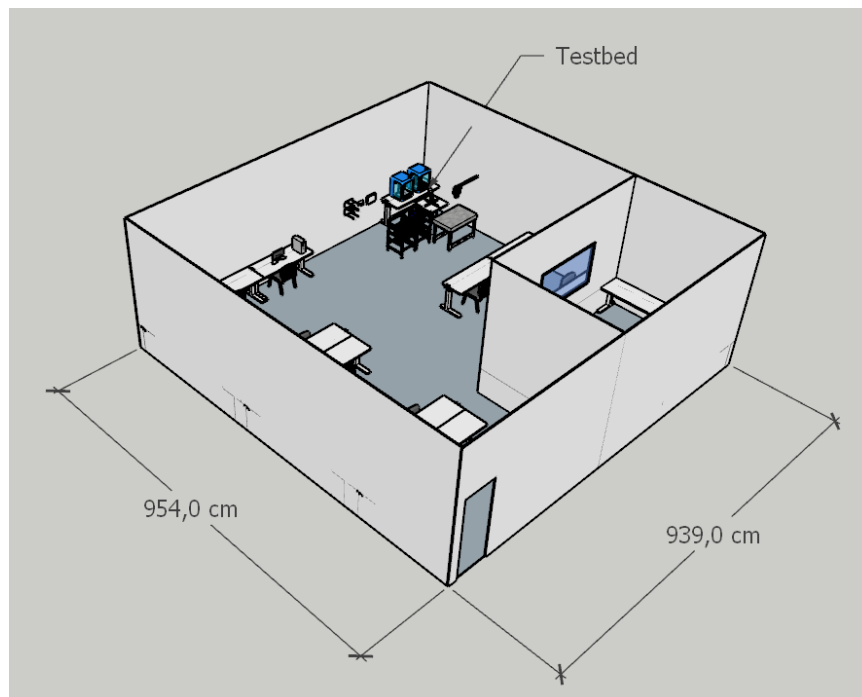


Figura 7: Novo *layout* do laboratório com o *testbed* instalado.
Fonte: Os autores.

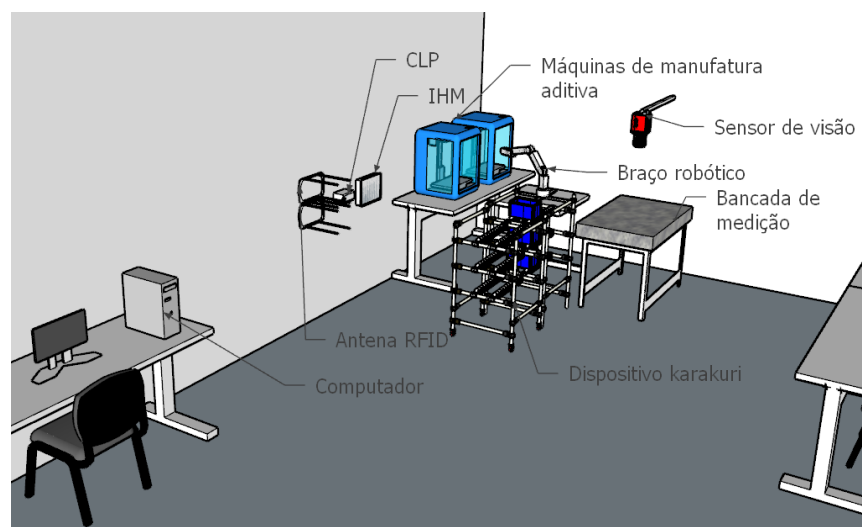


Figura 8: Posicionamento e descrição dos equipamentos.

Fonte: Os autores.

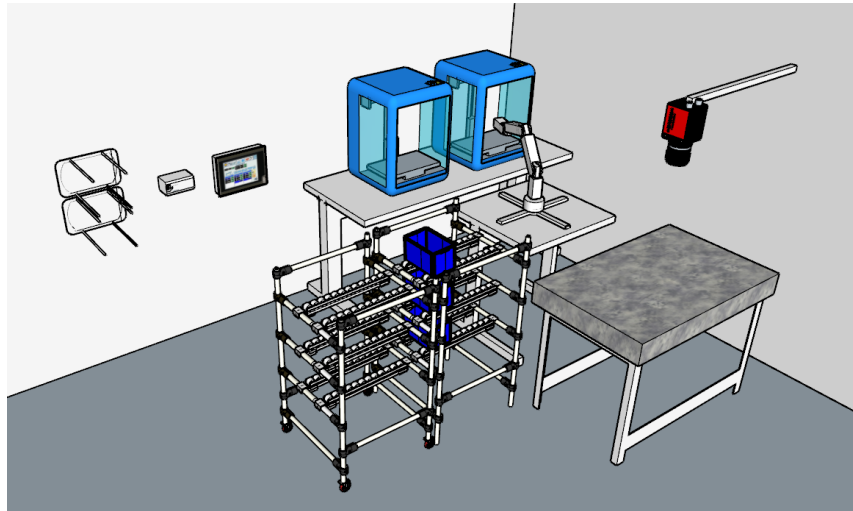


Figura 9: Detalhe do posicionamento dos equipamentos.
Fonte: Os autores.

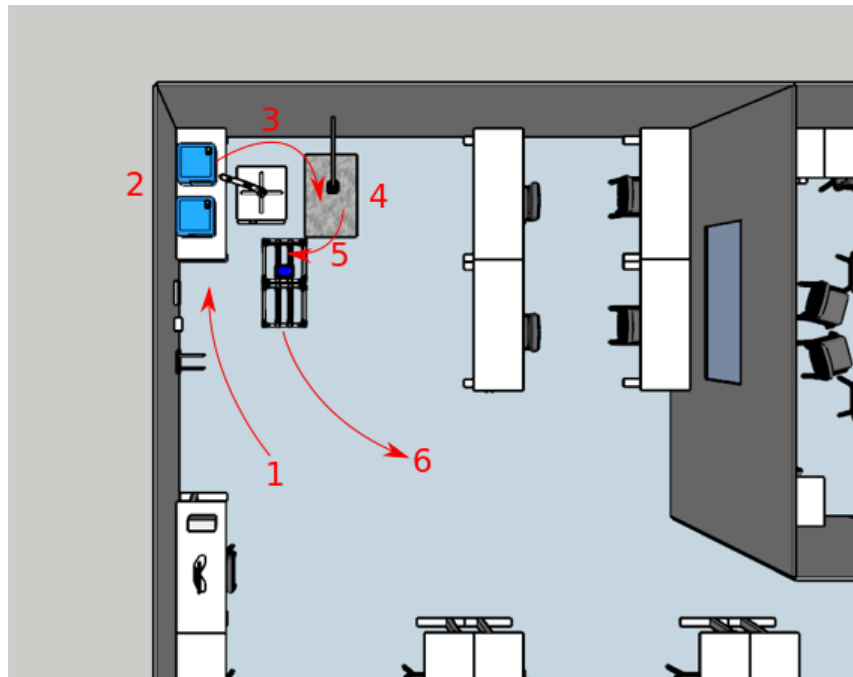


Figura 30: Fluxo de materiais no *testbed*.
Fonte: Os autores.

2.4. Linguagem de programação e conectividade

A linguagem de programação padrão utilizada nos CLPs da Siemens é a lógica ladder. Porém, o sistema que acompanha o hardware da Siemens (*Totally Integrated Automation Portal*, TIA Portal) também permite a utilização de Statement Lists (STL), Diagramas de Blocos de Funções, entre outras formas de programação padrão de CLPs.

O sensor de visão acompanha uma licença do software Siemens Pat-Genius, responsável pela identificação de objetos, e uma plataforma de configuração do sensor de visão baseada na internet. Ambos são configurados utilizando uma interface gráfica.

Os outros componentes da Siemens são configurados e programados diretamente pelo TIA Portal.

As máquinas de manufatura aditiva funcionam por meio de instruções presentes no arquivo “STL”, que são interpretadas pelo software de cada uma das impressoras 3D e convertidos em acionamentos em seus atuadores.

O robô colaborativo da Universal Robots é programado por meio da interface gráfica PolyScope, onde é possível mover o robô e armazenar os pontos no espaço, incluindo o posicionamento da ferramenta que esteja instalada no robô. Cada ponto no espaço que o robô deve se mover é inserido manualmente no programa. Esta programação é realizada diretamente no painel de controle do robô por meio da tela sensível ao toque ou conectando um mouse e teclado.

2.5. Testes possíveis

O laboratório em questão deverá ser capaz de executar diversos experimentos que facilitarão o entendimento dos conceitos da I4.0 e manufatura enxuta. O presente trabalho apresenta alguns experimentos pensados pelos autores, baseados na seção 1.43. Nota-se que os experimentos não foram realizados, uma vez que o laboratório não existe fisicamente. Dessa maneira é esperado que algumas alterações nos testes possíveis sejam necessárias para adequar-se à situação real.

Atualização do status de produção e pedido de matéria-prima

A tecnologia RFID aplicada nos produtos permitirá diversas novas aplicações. Uma vez que um produto possui um chip RFID desde o início da sua produção, é possível monitorar sua produção, armazenar dados e identificar quais produtos correspondem a quais clientes (uma vez que o sistema é puxado e a ordem do cliente que gerou o início da produção). Um primeiro experimento pode ser a transmissão de dados de produção em tempo real do *testbed* para uma plataforma que pode ser acessada por um ator desempenhando o papel de cliente. O *testbed* pode então manter o cliente informado do processo de produção a todo instante, de maneira similar ao rastreamento de pedidos fornecido por empresas como os Correios. Também pode indicar uma estimativa de conclusão da produção e entrega, que pode ser atualizada caso aconteçam atrasos. Esta estimativa também é utilizada para realizar o Planejamento e Controle da Produção e ajustar o ponto de ressuprimento na cadeia puxada, já informando os fornecedores.

Tabela 2: Teste para atualização do status da produção.

Etapa	Descrição
1	Cliente acessa a plataforma
2	Cliente solicita o status de produção do seu bem
3	<i>Testbed</i> recebe a solicitação
4	Computador comunica-se com a máquina de manufatura aditiva, solicitando o status da produção e tempo restante

Etapas	Descrição
5	Computador solicita ao ERP a disponibilidade do braço robótico no instante que o produto terminar a etapa de adição de material, assim como a disponibilidade do sensor de visão e outros processos
6	Computador solicita à empresa de logística a disponibilidade e o tempo estimado de entrega no momento que o produto for finalizado
7	Os tempos são somados
8	<i>Testbed</i> informa o cliente o status da produção e o tempo restante

Alteração das características do produto

O cliente também pode escolher alterar a produção do seu bem, logo o *testbed* também deverá ser capaz de receber novas orientações de seus clientes. Outro experimento permite que um processo de produção já em andamento seja alterado (dentro das capacidades físicas do mesmo) para atender uma mudança de demanda de um cliente. Por exemplo, após a medição da peça o robô deve posicioná-la em algum local que represente o processo de pintura da peça. Imaginando que existam dois locais possíveis, um representando o processo de pintura na cor A e outro representando o processo de pintura na cor B, caso o cliente tenha pedido inicialmente o produto na cor A mas, antes do processo de produção ter realizado a pintura, mude de ideia e peça a alteração para a cor B, o sistema deverá automaticamente realizar esta mudança, posicionando a peça no local correto.

Ainda, é possível que o cliente receba um produto na cor B mesmo que o seu produto já tenha sido pintado na cor A. Para isso basta que ele informe a sua mudança de exigência para o *testbed* e outro cliente faça um pedido de um produto na cor A. Assim, esse segundo cliente receberá o produto da cor A e o primeiro cliente aguardará a produção de um novo produto na cor B.

Tabela 3: Teste para alteração das características do produto durante sua produção.

Etapas	Descrição
1	Cliente solicita a produção de um produto da cor A
2	<i>Testbed</i> recebe a solicitação e inicia a produção
3	Cliente muda de ideia e solicita que o produto não seja pintado da cor A, e sim da cor B
4	<i>Testbed</i> verifica se o produto já foi pintado e então,
5	Caso não tenha sido pintado, o <i>testbed</i> altera o processo de produção
5	Caso já tenha sido pintado, o <i>testbed</i> verifica se existe algum pedido de produto na cor A, entregando imediatamente, caso contrário o produto na cor A é estocado
6	Produto é pintado na cor B e entregue
6	O <i>testbed</i> inicia a produção de um produto na cor B
7	Produto é pintado na cor B e entregue

Redução do tempo de operação e realocação de máquinas

Com a introdução do conceito do SMED associado à integração entre os componentes que um *testbed* pode ter, a quantidade total de operações de setup pode ser reduzida e consequentemente o tempo gasto na produção. Parte-se de um cenário de duas máquinas de manufatura aditiva trabalhando paralelamente na produção de um produto que não possui a necessidade de *setup* em uma fase intermediária (como troca de matéria prima ou reposicionamento de peça). Se alguma das impressoras receber uma nova ordem de produção de outros produtos, o *testbed* deverá ser capaz de definir qual das impressoras assumirá as operações de *setup* e qual continuará a produção dos produtos que já estavam sendo produzidos, redistribuindo a operação combinada de produção dos itens de maneira que o tempo total de operação das impressoras com os tempos de *setup* seja o menor possível.

Tabela 4: Teste de redução de tempo total de operação e realocação de máquinas.

Etapas	Descrição
1	Cliente solicita a produção de n unidades de uma peça A composta de material único
2	<i>Setup</i> inicial é realizado para as máquinas de manufatura aditiva
3	Ordem de produção de $n/2$ itens para cada máquina de manufatura aditiva
5	Antes do término da produção das peças A, nova ordem de produção de m unidades de uma peça B que é composta por um material diferente da peça A
6	Redistribuição da produção de itens (por exemplo, peças A continuam na máquina de manufatura aditiva 1 e peças B iniciam a produção na máquina de manufatura aditiva 2)
7	Nova operação de <i>setup</i> é realizada na máquina de manufatura aditiva escolhida no passo 6, preparando a produção da peça B
8	<i>Testbed</i> continua a produção das peças A e B

Substituição dos cartões kanban

A tecnologia RFID também permite substituir os cartões *kanban*. O próprio produto que possui um chip RFID será o *kanban*. Isto pode ser executado da seguinte maneira: o leitor de chips RFID é posicionado na saída da área de entregas. Assim que um produto é liberado e retirado da área de entregas a ausência daquele chip RFID é sentida pelo sistema e o mesmo já realiza o pedido de um novo produto, ou seja, o produto acaba realizando o papel do *kanban*.

Tabela 5: Teste para substituição dos cartões *kanban*.

Etapas	Descrição
1	Um produto é manufaturado e sua qualidade é confirmada
2	O produto é posicionado, pelo braço robótico, na área de entregas
3	O produto é retirado da área de entregas (por um ator realizando o papel de agente logístico)
4	O <i>testbed</i> , por meio da leitura do cartão RFID que está fixo no produto, verifica que o produto foi retirado da área de entrega
5	O <i>testbed</i> já solicita a produção de um novo produto

Atualização do MRP utilizando os chips RFID

As MP utilizadas na produção dos bens também podem vir com um chip RFID e a retirada do almoxarifado pode ser sentida pelo sistema RFID, que já indica que aquela MP deve ser atualizada no sistema MRP. Porém nem toda MP pode vir com o chip RFID, por exemplo a MP da máquina de manufatura aditiva, quer sejam os filamentos de polímero nas máquinas de fabricação por depósito de fundido (*Fused Deposition Modeling*, FDM) ou o pó de metal nas máquinas de sinterização. De qualquer maneira, ainda será possível realizar o controle automático da MP do almoxarifado. Para isso é necessário saber a quantidade exata de material utilizado em cada processo (as máquinas de manufatura aditiva possuem essas informações, assim como o projeto do produto). Com a produção de certos tipos de produto e a quantidade de MP utilizada naquele produto, o sistema MRP pode ser atualizado automaticamente.

Tabela 6: Teste para emissão de pedidos de matéria-prima.

Etapas	Descrição
1	Uma certa matéria-prima, que já possui um cartão RFID, é retirada do espaço que representa o almoxarifado
2	O <i>testbed</i> verifica que essa matéria-prima foi utilizada
3	O <i>testbed</i> realiza o pedido da matéria-prima no fornecedor

As questões de troca de informação entre o *testbed* e os atores que desempenham o papel de fornecedores é importante na ótica do nivelamento da produção, pois permite planejar a produção dos fornecedores com antecedência e manter uma estabilidade da demanda.

Poka-yoke utilizando o sistema de visão

O sistema de visão pode ser utilizado para não só realizar o controle de qualidade das peças produzidas, mas também para criar um dispositivo *poka-yoke* para o próprio manipulador robótico. O sistema de visão, neste experimento, seria capaz de detectar algum objeto deixado na mesa de medição e que iria atrapalhar o movimento do braço robótico. Assim que esta condição ocorresse, ele iria disparar um aviso para algum colaborador resolver o problema.

Tabela 7: Teste do sistema *poka-yoke* utilizando visão computacional.

Etapas	Descrição
1	Banca de medição possui algum objeto estranho à mesa
2	Sistema de visão do <i>testbed</i> identifica o objeto
3	A produção é parada
4	Um alerta é emitido para que o objeto estranho seja retirado
5	Colaborador retira o objeto da mesa
6	Sistema de visão identifica que a mesa está livre
7	Produção é liberada

Simulação da cadeia de valor

O *testbed* pode ainda ser integrada com outros sistemas produtivos para simular uma cadeia de valor. Neste experimento seriam necessárias outros *testbeds* ou sistemas produtivos, localizados em outros locais. Um dos *testbeds* exerceria o papel de fornecedor e a outra de produtor. O ponto de ressuprimento da produtora poderá ser influenciado pela disponibilidade e capacidade do fornecedor (embora em um sistema de manufatura enxuta isso deve-se ocorrer *a priori* e constar no *Service Level Agreement*). Ainda é possível integrar este sistema com alguma plataforma que possua informações em tempo real do trânsito. Isso permitirá realizar um ajuste mais fino do ponto de ressuprimento, que influencia em outras questões como estoque por exemplo.

Utilização dos sensores para medir a saúde dos equipamentos

Os sensores adquiridos podem ser acoplados às máquinas para indicar o nível de “saúde” das mesmas. Essa informação pode ser utilizada automaticamente pelo próprio sistema para planejar a manutenção do equipamento ou parar a produção e emitir um sinal de alerta para que uma manutenção seja realizada, seguindo padrões e práticas do TPM.

Para isso deverá ser pensado algum índice de saúde para os equipamentos (braço robótico e máquinas de manufatura aditiva) que podem utilizar a temperatura, som e vibração dos mesmos. Essas três variáveis podem ser medidas pelo sensor XDK da Bosch. Uma variação dessa utilização é monitorar os padrões ambientais do local onde o *testbed* está instalado, já que o sensor também é capaz de medir umidade e pressão.

Com o apoio de sistemas de visão e virtualização dos componentes que identificam as peças manufaturadas, a coleta de dados para o repositório de dados das operações torna-se de grande valor para análise de performance do conjunto de equipamento presentes no *testbed*. Os dados para construção da análise do controle estatísticos de processo e sensoriamento do ambiente podem ser alimentados e monitorados em *real-time* em uma estrutura como a proposta no decorrer do trabalho. A associação da cognição do sistema para tomada de decisão foi identificada na seção 1.3 e pode ser implementada como um alerta indicando a previsibilidade de desvios em produtos que impactam a eficiência da operação. Dessa maneira, a combinação desses dados tem a função de parada da produção, suportada por séries históricas de coleta de dados. Indica-se aqui o conceito de *andon* para a rápida sinalização de um problema identificado sem a necessidade de intervenção humana, apenas na sua correção.

Integração da produção de conjunto de peças

A medição das dimensões e sensoriamento das peças durante processo produtivo oferece a possibilidade de adaptação de peças subsequentes baseado em desvios relacionados às suas especificações. Por exemplo duas peças (Peça A e Peça B) do tipo macho-fêmea sendo produzidas paralelamente em duas impressoras possuem diâmetro externo de eixo de 49 mm e diâmetro interno de acoplamento de 50 mm, respectivamente. A estrutura do *testbed* permite que a impressora produzindo a peça B altere a dimensão do seu diâmetro de acoplamento para que a diferença entre as peças produzidas tenha o valor fixo de 1 mm. Esse ajuste feito no decorrer do processo pode garantir o sucesso do acoplamento de peças com interface de contato e segue a linha de minimizar o descarte de peças, o desperdício de MP e aplicação conceitual e adaptada do *Jidoka*, evitando que a produção de irregularidade nas peças seja configurada como defeito de fabricação.

Desligamento automático de equipamentos

O *testbed* também poderá diminuir desperdícios energéticos de forma automática. Máquinas e equipamentos que possam ser desligados devem ser planejados para o fazerem, economizando energia e recursos. Isso pode ser feito com o estudo da demanda do *testbed*.

Esse teste já foi proposto em Kagermann; Wahlster e Helbig (2013)[6] no primeiro exemplo de aplicação. Essa é uma funcionalidade muito importante, já que segundo os autores em uma linha de produção automotiva, 12% da energia consumida acontece durante pausas na produção (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013)[6].

Após os trabalhos realizados é possível afirmar que a construção de um laboratório de manufatura avançada é viável com um investimento inicial menor que R\$250.000,00. Nota-se que esses equipamentos podem ser utilizados nas operações de uma empresa e não necessariamente de um laboratório didático, já que são em grande parte de padrão industrial.

3. CONCLUSÃO

Com a análise dos conceitos de manufatura enxuta, identificou-se a possibilidade de seu uso em conjunto com a implementação da Indústria 4.0, bem como listar as dificuldades de integração dentre os temas. Através de proposta de *layout* de laboratório e testes a serem realizados, buscou-se estruturar um local com a finalidade de estudo entre os temas de manufatura avançada e *lean manufacturing*.

Analisando de maneira geral é possível perceber que tanto os conceitos da manufatura enxuta quanto da I4.0 possuem como objetivo o aumento da produtividade e eficiência. Os meios para atingir esse objetivo variam em cada uma das óticas de produção e por isso não devem ser considerados separadamente para a implantação em um processo produtivo. A ABDI em sua “Agenda Brasileira para a Indústria 4.0” apresenta esta união de conceitos pela “Estratégia Dual” [4]. Seguindo esta estratégia, a indústria brasileira atual é transformada e torna-se mais eficiente a partir da implementação de conceitos de gestão da manufatura enxuta e o uso das tecnologias da I4.0 para a análise e uso inteligente dos dados.

Um dos principais interesses dos autores deste trabalho foi estar perto e participar da pesquisa e desenvolvimento deste novo desafio de adaptação do sistema produtivo. O estudo da história dos sistemas produtivos auxiliou no entendimento da quebra dos paradigmas de produção ao longo dos anos e permitiu entender melhor como funciona a dinâmica de forças culturais e barreiras tecnológicas que atuam como agentes de mudanças. A execução das cotações também foi importante para familiarizar-se com a atual estrutura comercial de equipamentos estado da arte executada no Brasil, além de já servir como porta de entrada para futuras parcerias entre a UFABC e empresas privadas do setor de tecnologia.

A restrição orçamentária no valor de R\$250.000,00 restringiu a lista de equipamentos a serem utilizados e dessa maneira tal proposta pode servir de ponto inicial para que componentes complementares sejam disponibilizados e avaliados para serem adicionados na gama de testes a serem performados. Considerando que o *testbed* não possui como um de seus componentes os óculos de realidade aumentada por exemplo, essa tecnologia pode ser utilizada futuramente para criar um dispositivo *poka-yoke* virtual, auxiliando os colaboradores envolvidos no processo de produção a não cometerem erros.

Também é possível explorar em muita profundidade a área de softwares necessários para o funcionamento do *testbed*, desde ERPs até aplicativos de processamento de dados em nuvem utilizando inteligência artificial e *machine learning*. Esta análise não foi realizada pois não estava no escopo do trabalho, mas também é importante.

Como recomendação para a continuidade do trabalho, entende-se que as tarefas de programação dos testes e comunicação efetiva entre os protocolos de camadas distintas terão grande importância para o projeto de criação e operacionalização do *testbed*.

Retomando as perguntas inicialmente realizadas: *Que tipo de testbed é possível montar com um investimento relativamente baixo? Quais testes poderiam ser executados neste testbed para mostrar a sinergia dos conceitos da manufatura enxuta e Indústria 4.0?* Por meio das cotações é possível afirmar que um *testbed* muito flexível e que utiliza tecnologias muito atuais (como é o caso das máquinas de manufatura aditiva e do robô colaborativo) pode ser adquirido com um investimento aproximado de R\$250.000,00. Porém também será necessária mão-de-obra qualificada para a integração de todos os componentes. Quanto aos testes que poderiam ser executados, foi possível propor 10 testes.

Com o encerramento do ciclo de proposta de *layout* e dos testes a serem realizados no laboratório, o próximo passo é executar a instalação dos componentes na disposição indicada. É necessário analisar a viabilidade técnica dos testes propostos com os equipamentos disponíveis e validá-los. A revisão e proposta de novos testes é uma atividade fundamental para o pós-implantação dos equipamentos, seja pela disponibilização futura de novos equipamentos, seja pela indisponibilidade de máquinas inicialmente orçadas e propostas no presente trabalho. Uma revisão baseada no ciclo PDCA tende a evitar ociosidade de equipamentos ou a redução do valor das análises realizadas, caso haja um diagnóstico obsoleto quanto às tecnologias e equipamentos presentes no *testbed*.

4. REFERÊNCIAS

[1] CNI, C. N. DA I. **Participação da indústria na economia brasileira sobe para 22%, diz CNI**. Disponível em:

<<https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/economia/participacao-da-industria-na-economia-brasileira-sobe-para-22-diz-cni/>>. Acesso em: 21 abr. 2019.

[2] MOURTZIS, D.; DOUKAS, M.; BERNIDAKI, D. Simulation in manufacturing: Review and challenges. **Procedia CIRP**, v. 25, n. C, p. 213–229, 2014.

[3] PEREZ, C. Technological revolutions and techno-economic paradigms. **Cambridge Journal of Economics**, v. 34, n. 1, p. 185–202, 2009.

[4] MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA COMÉRCIO E SERVIÇOS. **Agenda brasileira para a Indústria 4.0**. Disponível em: <<http://www.industria40.gov.br/>>. Acesso em: 10 ago. 2018.

[5] **Cyber-Physical Systems**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

[6] KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0 - Securing the Future of German Manufacturing Industry**. München: [s.n.].

[7] KANG, H. S. et al. Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 3, n. 1, p. 111–128, 23 jan. 2016.

[8] LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H.-A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18–23, jan. 2015.

[9] **Industrie 4.0 Maturity Index**. . München: [s.n.].

[10] BOSCHERT, S.; ROSEN, R. Digital Twin—The Simulation Aspect. In: **Mechatronic Futures**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 59–74.

[11] WAGNER, T.; HERRMANN, C.; THIEDE, S. Industry 4.0 Impacts on Lean Production Systems. **Procedia CIRP**, v. 63, p. 125–131, 2017.

[12] MRUGALSKA, B.; WYRWICKA, M. K. Towards Lean Production in Industry 4.0. **Procedia Engineering**, v. 182, p. 466–473, 2017.

[13] KOLBERG, D.; ZÜHLKE, D. Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies.

[14] SANDERS, A.; ELANGESWARAN, C.; WULFSBERG, J. Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. **Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 9, n. 3, p. 811, 21 set. 2016.

[15] **CPS in manufacturing. Example of Industry 4.0. TECNALIA**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=efMIVaZLk-E>>.

[16] RÜTTIMANN, B. G.; STÖCKLI, M. T. Lean and Industry 4.0—Twins, Partners, or Contenders? A Due Clarification Regarding the Supposed Clash of Two Production Systems. **Journal of Service Science and Management**, v. 09, n. 06, p. 485–500, 2016.