



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Interação entre Filosofia Lean e Indústria 4.0

Estudo Exploratório

Beatrice Paiva Santos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia e Gestão Industrial
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Fernando Manuel Bigares Charrua Santos
Coorientador: Prof. Doutora Tânia Daniela Felgueiras Miranda Lima

Covilhã, Junho de 2017

Dedicatória

Aos meus pais, Humberto e Ana Maria, minha maior inspiração.

Agradecimentos

Aos meus orientadores Prof. Doutor Fernando Manuel Bigares Charrua Santos e Prof. Doutora Tânia Daniela Felgueiras Miranda Lima pela ajuda e disponibilidade, essenciais para a concretização deste projeto.

Ao meu marido Geovany Amorim pelo amor e compressão durante essa jornada e por mudar toda a sua vida para que eu pudesse realizar este sonho.

A toda minha família pelo amor incondicional e estarem sempre presentes, mesmo estando longe.

Aos meus amigos Andre Laender Pita e Rozelia Laurett os meus mais sinceros agradecimentos pela companhia, partilha e apoio nos momentos difíceis.

“Obrigada”.

“Tudo vale a pena, quando a alma não é pequena”

Fernando Pessoa

Resumo

A evolução das tecnologias de informação e a sua introdução nos processos de produção está a transformar a indústria, elevando-a para um novo patamar de desenvolvimento organizacional. A fim de aproveitar os benefícios dessas tecnologias para fortalecer a competitividade no mercado global, uma mudança de paradigma de produção está a ser discutida em todo mundo: *Industry 4.0*.

Não há dúvidas que esta nova abordagem terá um grande impacto não só na melhoria da produtividade, mas também no desenvolvimento de novos produtos, serviços e modelos de negócios. Ao mesmo tempo coloca-se em questão qual será o papel da filosofia de gestão *Lean* nesses novos ambientes de produção.

Assim, este trabalho tem como objetivo intensificar a discussão sobre como a combinação desses dois paradigmas de produção pode ser a chave para alcançar o grau de flexibilidade necessário para superar os desafios atuais de alta variabilidade, personalização e redução dos ciclos de vida dos produtos.

Através de uma extensa revisão bibliográfica, os paradigmas *Lean* e *Industry 4.0* são examinados a fim de definir o seu estado da arte. Na sequência procura-se avaliar as vantagens da sua combinação e apresentar um plano de propostas com exemplos de como as tecnologias que compõem a *Industry 4.0* podem potencializar as ferramentas *Lean* fornecendo as soluções necessárias para atingir os objetivos globais de alta eficiência e qualidade.

Palavras-chave

Lean Production, Industry 4.0, tecnologias, Augmented Reality, RFID, 3D printing

Abstract

The evolution of information technologies and their introduction into production processes is transforming traditional industry, rising it up to a new level of organizational development. In order to take advantage of the benefits of these technologies to strengthen competitiveness in the global market, a paradigm shift of production is being discussed worldwide: Industry 4.0.

There is no doubt that this new approach will have major impacts not only on improving productivity but also on developing new products, services and business models. At the same time, the role of the Lean management philosophy in these new production environments is questioned.

Thus, this paper aims to intensify the discussion about how the combination of these two production paradigms can be the key to achieving the degree of flexibility necessary to overcome the current challenges of high variability, customization and reduction of product life cycles.

Through an extensive literature review, Lean and Industry 4.0 paradigms are examined separately in order to define their state of the art. The next step is to evaluate the advantages of their combination and present a proposals plan with examples of how technologies enabled by Industry 4.0 can potentiate Lean tools by providing the solutions needed to achieve the global goals of high efficiency and quality.

Keywords

Lean Production, Industry 4.0, technologies, Augmented Reality, RFID, 3D printing

Índice

Dedicatória.....	iii
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Palavras-chave	vii
Abstract.....	ix
Keywords	ix
Índice	xi
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xv
Lista de Acrónimos e Siglas	xvii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodologia	3
1.4. Estrutura da Dissertação.....	4
2. Lean Production	6
2.1. Definição	6
2.2. Origens e Evolução do Conceito Lean	7
2.3. Princípios	10
2.4. Desperdícios	15
2.5. Ferramentas	18
2.6. Barreiras e Benefícios na Implementação Lean Production (Status Quo)	21
3. Industry 4.0.....	25
3.1. Background.....	25
3.2. Conceitos	26
3.2.1. Radio Frequency Identification (RFID)	30
3.2.2. Augmented Reality (AR)	31
3.2.3. Additive Manufacturing.....	31
3.3. Potencial Tecnológico da Industry 4.0	32
3.4. Desafios.....	33
3.4.1. Segurança e Proteção Digital	34
3.4.2. Padronização	34
3.4.3. Organização do Trabalho	35
3.4.4. Capacidade Cognitiva	35
3.4.5. PME.....	35
4. Integração Lean e Industry 4.0.....	37

4.1. Vantagens da Combinação	37
4.2. Soluções Industry 4.0 para Lean Production	39
4.2.1. Continuous Flow	39
4.2.2. Just in Time (JIT).....	40
4.2.3. Kanban	41
4.2.4. Poka-Yoke.....	41
4.2.5. Pull System	42
4.2.6. Single-Minute Exchange of Die (SMED).....	43
4.2.7. Supplier Development	43
4.2.8. Value Stream Mapping (VSM)	44
5. Principais Conclusões	47
Referências Bibliográficas.....	49

Lista de Figuras

Figura 1. Estrutura da Dissertação.....	5
Figura 2. Os sete princípios Lean thinking	13
Figura 3. Representação Muda, Mura e Muri	17
Figura 4. Revoluções Industriais	26
Figura 5. Tecnologias Industry 4.0	27

Lista de Tabelas

Tabela 1. Exemplos de Técnicas e Ferramentas Lean.....	18
Tabela 2. Barreiras e Soluções Propostas na Implementação LP.....	24
Tabela 3. Quadro Resumo Integração Industry 4.0 e Lean	45

Lista de Acrónimos e Siglas

AR	Augmented Reality
B2B	Business to Business
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CPS	Cyber Physical System
ERP	Enterprise Resource Planning
EUA	Estados Unidos da América
HMD	Head Mounted Display
I&D	Investigação e Desenvolvimento
I4.0	Industry 4.0
IMVP	Internacional Motor Vehicule Program
IoE	Internet of Everthing
IoS	Internet of Service
IoT	Internet of Things
JIT	Just in Time
KPI	Key Performance Indicator
LE	Lean Enterprise
LP	Lean Production
M2M	Machine to Machine
MIT	Massachusetts Institute of Tecnology
MRP	Material Resource Planning
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PME	Pequena e Média Empresa
RFID	Radio Frequence Identification
SaaS	Software as a Service
SCM	Suply Chain Management
SMED	Single Minute Exchange of Die
TI	Tecnologia da Informação
TOC	Theory of Constraints
TPM	Total Productivity Maintenance
TPS	Toyota Production System
TQM	Total Quality Management
UE	União Europeia
VPM	Value Stream Mapping
WIP	Work in Progress

1. Introdução

1.1. Enquadramento

No final do sec. XVIII, a primeira revolução industrial marcou a transição dos métodos de produção artesanais para os processos de produção mecanizados. Essas mudanças revolucionaram não só a economia, com o aumento da produtividade, mas a vida quotidiana das pessoas. Desde então, a indústria tem passado por transformações nos seus sistemas de produção e de gestão. Os mercados procuram oferecer uma elevada personalização para responder às necessidades de clientes cada vez mais exigentes. Estas exigências surgem de solicitações como expectativas crescentes de produtividade, aumento do número de variantes de produtos, redução de tamanhos de lotes, etc (Cheng, et al., 2015).

Nesse cenário destacam-se dois paradigmas de produção. O primeiro, a *Lean Production* (LP), centra-se na redução dos desperdícios a fim de aumentar o valor para os clientes dentro de uma filosofia de melhoria contínua. Dessa forma, a filosofia *Lean* busca melhorar os processos para atingir elevados níveis de produtividade, flexibilidade, desempenho, qualidade, para além da redução dos custos de produção. Estes resultados são alcançados através da aplicação de uma variedade de ferramentas, métodos ou técnicas, como por exemplo, *Kanban*, *Just in Time*, *Single Minute Exchange of Die* (SMED), *Kaizen*, entre outras e de uma gestão complexa, pró-qualidade, em todas as áreas da organização (Wyrwicka & Mrugalska, 2015).

O segundo está a ser discutido em todo o mundo sob o tópico de *Industry 4.0* (I4.0) (Hermann, et al., 2016). Considerado por alguns académicos e empresários como a 4ª revolução industrial (Bitkom; Vdma; ZVI, 2016), a I4.0 é um dos termos utilizados para descrever a estratégia alemã de alta tecnologia que está a ser implementada pela indústria. Abrange um conjunto de tecnologias de ponta ligadas à internet com o objetivo de tornar os sistemas de produção mais flexíveis e colaborativos. Nessa abordagem, as máquinas usam auto-otimização, auto-configuração e até mesmo inteligência artificial para completar tarefas complexas, a fim de proporcionar eficiências de custo muito superiores e bens ou serviços de melhor qualidade (Bahrin, et al., 2016). Através da implementação generalizada de sensores no ambiente de produção, os mundos físico e virtual fundem-se, dando origem aos *Cyber Physical Systems* (CPS). Estes sistemas são conectados através da *Internet of Things* (IoT) interagindo uns com os outros, usando protocolos padrão baseados na internet, e analisam dados para prever falhas e adaptar-se às mudanças (Michael, et al., 2015).

Estas novas estruturas industriais, onde os produtos e os sistemas de produção obtêm capacidades de comunicação podem ser a chave para atingir os elevados níveis de

produtividade e de qualidade pretendidos pela LP. Portanto, sobreviver nesse contexto dinâmico envolverá a consideração de aspectos relacionados a esses dois paradigmas.

Perante isto, Martinez , et al. (2016) analisaram 531 resumos de publicações relacionadas com o tópico I4.0 com o intuito de investigar o envolvimento da gestão Lean nessa nova revolução. Os resultados revelaram que as publicações em I4.0 têm uma baixa ou nenhuma correlação com o tópico Lean. Ainda segundo estes autores, uma publicação que tenha elevada relação com o tópico I4.0, apresenta uma menor relação com o tópico Lean.

Face à identificação desta lacuna na literatura, este trabalho tem como objetivo explorar a integração dessas duas abordagens de produção e demonstrar como a implementação de ambas não deve ser mutuamente exclusiva. Elas podem ser perfeitamente combinadas de forma a se apoiarem no desenvolvimento de uma estrutura que permita melhorar a produtividade, a flexibilidade, e a eficiência nas aquisições e análises de dados, e tudo isto a custos reduzidos de produção (Temple, 2016).

1.2. Objetivos

Desde a primeira revolução industrial, a indústria tem evoluído em todas as suas dimensões. Para responder às exigências de clientes em constante mudança, as organizações estão a ser obrigadas a encontrar novos métodos e ferramentas para sustentar o seu posicionamento no mercado e continuar a crescer num cenário de alta competitividade.

Face a estes desafios o presente trabalho tem como objetivo geral explorar o atual estado do conhecimento para compreender e entender as expectativas e os desafios impostos pela integração das novas tecnologias nos processos produtivos. Para tal, dois paradigmas de produção são amplamente investigados: a *Lean Production* e a *Industry 4.0*. A *Lean Production*, é uma filosofia de gestão amplamente aceite e aplicada numa variedade de indústrias em todo o mundo e a *Industry 4.0*, é uma abordagem que surgiu como uma estratégia para aumentar a competitividade das indústrias alemãs e que integra tecnologias de informação e comunicação nos ambientes de produção.

Como objetivo específico pretende-se verificar o atual envolvimento dessas duas abordagens de produção. Assim, procura-se responder à seguinte pergunta de investigação: As tecnologias da *Industry 4.0* atuam como facilitadoras, fornecendo as ferramentas necessárias para alavancar os sistemas de produção *Lean*?

Para responder a esta questão foi desenvolvido um plano de propostas composto por um conjunto de tecnologias contempladas pela I4.0, com potencial para apoiar as ferramentas LP

no alcance dos objetivos da melhoria contínua. Além disso, perante a identificação na literatura do fosso existente entre estes dois domínios, este trabalho pretende fornecer um importante *insight* para profissionais do ramo e decisores sobre como eles poderão empenhar-se nesta nova Revolução Industrial, considerando os investimentos necessários, os requisitos exigidos e os seus potenciais benefícios.

1.3. Metodologia

De acordo com Gil (2002), o processo de investigação pode ser definido como um procedimento racional e sistemático que pretende dar resposta aos problemas propostos. Para Bhattacharjee (2012) a investigação científica opera em dois níveis: a um nível teórico e a um nível empírico.

O nível teórico preocupa-se com o desenvolvimento de conceitos abstratos sobre um fenómeno natural ou social e as relações entre esses conceitos, enquanto o nível empírico refere-se ao teste de conceitos e análise dos relacionamentos teóricos existentes entre eles com o objetivo de construir melhores teorias. Dessa forma, uma teoria torna-se cada vez mais refinada, isto é, encaixa-se melhor nas realidades observadas e a ciência ganha maturidade.

Ainda de acordo com Bhattacharjee (2012), dependendo dos objetivos propostos, uma investigação científica pode assumir duas formas: indutiva ou dedutiva. Na investigação indutiva, o objetivo é inferir conceitos e padrões teóricos dos dados observados. Na dedutiva, o objetivo é testar conceitos e padrões conhecidos da teoria usando novos dados empíricos.

Embora ambas as abordagens de investigação sejam importantes para o avanço da ciência, contribuindo para melhores explicações dos fenómenos de interesse e melhores teorias, parece que a investigação indutiva é mais valiosa quando há poucas teorias ou explicações sobre um determinado tema, enquanto que a abordagem dedutiva é mais produtiva quando há muitas teorias concorrentes sobre um mesmo fenómeno (Bhattacharjee, 2012).

Perante essas características, a metodologia selecionada para o presente trabalho envolve uma abordagem indutiva, à medida que permite expandir uma teoria existente (uma variante de criar uma nova teoria), pensando os problemas de investigação de modo ascendente. A partir desse raciocínio é possível observar fenómenos particulares, identificar as regularidades entre eles, e generalizar o objeto investigado.

Seguindo a via indutiva, e com vista a atingir os objetivos propostos, a abordagem adotada pode ainda ser classificada como exploratória, uma vez que visa proporcionar maior familiaridade com um problema de maneira a torná-lo explícito. Esse tipo de abordagem é frequentemente utilizada em novas áreas de investigação, onde os objetivos podem ser: i)

determinar a magnitude ou extensão de um fenómeno, problema ou comportamento específico, ii) gerar ideias iniciais sobre o fenómeno, ou iii) testar a viabilidade de forma a realizar um estudo mais extenso sobre o fenómeno (Bhattacharjee, 2012).

Como método de recolha de dados foi realizada uma revisão bibliográfica não exaustiva e a análise de dados secundários. Para tal, foram consultados artigos científicos, livros, relatórios governamentais e documentos de sites corporativos. Apesar das limitações impostas pela utilização de dados que foram recolhidos e tratados por outras fontes, de acordo com Bhattacharjee (2012), a análise de dados secundários pode ser um meio efetivo onde a recolha de dados primários é muito dispendiosa ou inviável e os dados secundários estão disponíveis a um nível de análise adequado para responder as perguntas da investigação.

1.4. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada em 5 capítulos. No capítulo 1 é apresentada a introdução, com o enquadramento do tema, descrição dos objetivos, a metodologia de investigação e a apresentação da sua estrutura. No capítulo 2 exposta a revisão bibliográfica da filosofia *Lean*. Uma vez que podem ser encontradas uma diversidade de conceitos na literatura, procura-se fornecer uma melhor compreensão sobre o tema através de um amplo estudo envolvendo a sua evolução histórica, principais características, práticas e ferramentas e uma visão geral sobre o estado atual da investigação. No capítulo 3, o tópico *Industry 4.0* é introduzido, onde também através de uma revisão bibliográfica são apresentados os seus principais componentes, o potencial tecnológico para as indústrias do futuro e os desafios que ainda precisam ser superados para a sua efetiva implementação. No Capítulo 4 deste trabalho são exploradas as vantagens de combinar a *Lean Production* e a *Industry 4.0* numa perspectiva de melhoria contínua. Neste capítulo são apresentadas algumas soluções da I4.0 para a LP e exemplos de como as novas tecnologias disponibilizadas pela I4.0 podem agregar valor para as organizações *Lean*, fortalecendo as suas ferramentas e ajudando a superar as suas deficiências para melhorar a competitividade. Por último, o capítulo 5 avalia o cumprimento dos objetivos traçados para esta investigação, através da análise do conteúdo abordado e as principais conclusões, apresentam-se ainda as limitações encontradas no desenvolvimento da mesma e apontam-se as oportunidades para trabalhos futuros.

A Figura 1 apresenta um esquema da estrutura da investigação realizada nesta dissertação.

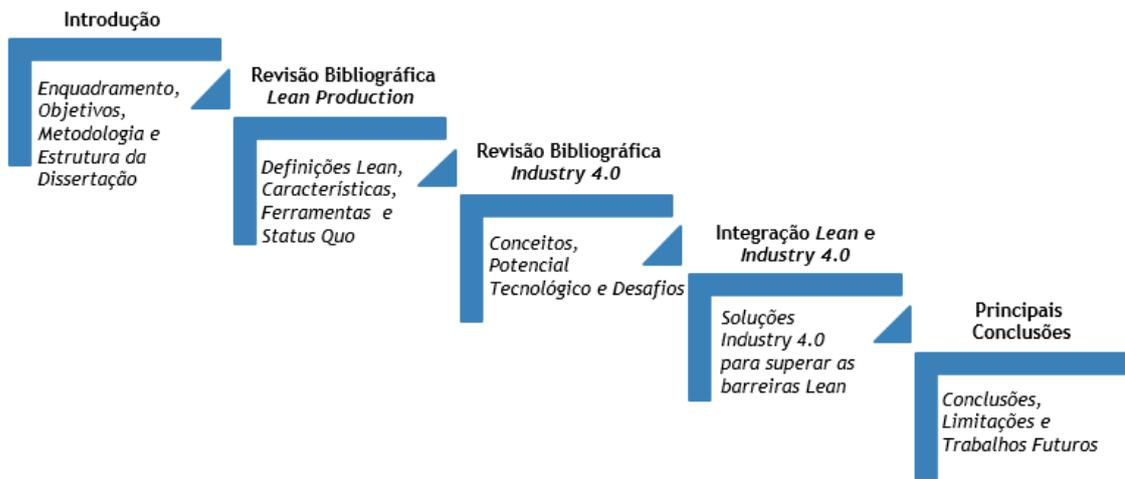


Figura 1. Estrutura da Dissertação

2. Lean Production

2.1. Definição

Nos últimos anos, a aplicação da *Lean Production* (LP) em diferentes tipos de indústrias tem crescido rapidamente. Entretanto, o conceito que teve origem no Japão ainda provoca confusão sobre o seu real significado. Pettersen (2009) comparou a literatura contemporânea e concluiu que não há consenso sobre a definição da LP entre os autores. Os investigadores também parecem ter opiniões diferentes acerca de que características estão associadas ao conceito *Lean*.

De acordo com Shah & Ward (2007), a multiplicidade de descrições existe porque a LP evoluiu ao longo do tempo, resultando em inúmeras abordagens, de implementação e esforços equivocados de organizações, que fazem uso apenas de um conjunto limitado de ferramentas sem abraçar a filosofia subjacente. Shah & Ward (2007) acrescentam ainda que a LP é composta por múltiplos atributos que abrangem características filosóficas que são muitas vezes difíceis de serem diretamente mensuradas (Shah & Ward, 2007).

Stone (2012) descreveu o termo *Lean Production* como referindo-se às técnicas de fabricação desenvolvidas nos últimos 100 anos pela Toyota Motor Company. Segundo Drew, et al. (2004) “*Lean* é um conjunto de princípios, práticas, ferramentas e técnicas destinadas a abordar as causas de baixo desempenho operacional. É uma abordagem sistemática para eliminar as perdas de toda a cadeia de valor de uma empresa, a fim de aproximar o desempenho atual das necessidades do cliente”. Para Scherrer-Rathje, et al. (2009) a *Lean Production* é uma filosofia de gestão focada na identificação e eliminação de desperdícios em todas as áreas da organização. Isto inclui a relação com os clientes, o desenvolvimento dos produtos, os processos de produção, a rede de fornecedores, a manutenção, a garantia da qualidade e a gestão da produção. Pinto (2009) descreve o Pensamento *Lean* como uma filosofia de liderança e gestão cujo objetivo é o desenvolvimento de pessoas, processos e sistemas, tendo em vista a identificação e a redução gradual e sistemática do desperdício em toda a organização e a criação de valor para todas as partes interessadas.

De acordo com Womack, et al. (1990) este modelo organizacional é extremamente vantajoso quando comparado com o modelo de produção em massa, uma vez que usa metade do esforço humano na fabricação, metade do espaço para produção, metade do investimento em equipamentos e metade das horas de engenharia para desenvolver um novo produto. Também requer muito menos de metade dos *stocks*, para além de resultar num número mais reduzido de defeitos, e produzir uma maior e sempre crescente variedade de produtos (Womack, et

al., 2007). A ideia chave que compreende esta filosofia é “*doing more with less*” (Radnor & Boaden, 2004).

2.2. Origens e Evolução do Conceito *Lean*

O termo *Lean Production* (LP), traduzido para o português como “Produção Magra” foi usado pela primeira vez por Krafcik em 1988 (Holweg, 2007; Jasti & Kodali, 2015). Chamou-lhe *Lean* por considerar que utilizava menores quantidades de tudo em comparação com a produção em massa (Lorenzon & Martins, 2006). O conceito foi popularizado após a publicação do livro “*The Machine That Changed the World*” (Womack, et al., 1990), que resumiu os resultados de uma investigação de cinco anos organizada pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Esse programa de investigação denominado *Internacional Motor Vehicule Program* (IMVP) iniciou-se em 1985 e tinha como objetivo apresentar um estudo comparativo sobre o desempenho da indústria automóvel após a crise do petróleo em meados da década de 70. O estudo concluiu que o desempenho do sistema de produção da empresa de automóveis japonesa *Toyota*, conhecido por *Toyota Production System* - TPS, era muito superior ao de outras empresas europeias e norte-americanas desse mesmo ramo (Monden, 1998). De acordo com Holweg(2007), a missão da IMVP “não era apenas descrever a diferença entre o mundo ocidental e o Japão, mas também identificar o tamanho da lacuna”.

Apesar do conceito da LP ter surgido apenas em 1990, as origens da ideologia que envolve o conceito remontam aos ateliês dos fabricantes japoneses e, em particular, das inovações realizadas na *Toyota Motor Corporation* (Ohno, 1988).

Em 1924, Sakichi Toyoda, especializado em maquinaria têxtil, juntamente com o seu filho Kiichiro Toyoda, desenvolvem um tear automático com paragens automáticas em situações anormais. A automação do processo que anteriormente era feito apenas manualmente, possibilitou a deteção automática de anomalias. Esta automatização permitiu que um operador trabalhasse com mais de trinta teares simultaneamente, com impacto na melhoria da produtividade e da qualidade dos produtos fabricados. Dois anos depois, com o objetivo de consolidar a estrutura da produção em grande escala Kichiro funda a fábrica de teares automáticos *Toyoda*, introduzindo o modelo americano de produção em série. Em 1929, os líderes da Toyota Sakichi e seu filho Kiichiro Toyoda acompanhados por outros engenheiros, como Shigeo Shingo e Taiichi Ohno, visitam as instalações da Ford e da General Motors nos EUA para adquirir novos conhecimentos e procurar soluções para melhorar o desempenho da empresa. Embora nesse período a economia japonesa já começasse a dar sinais de crise, Kichiro, prossegue a sua investigação em motorização nos laboratórios da fábrica de teares e em 1935 conclui o primeiro protótipo do automóvel de passeio modelo A1 da *Toyoda*.

Em 1937, Kiichiro funda a *Toyota Motor Corporation* e tendo em conta as diferenças entre a indústria de teares e a indústria automobilística elabora um novo conceito de produção, o *Just in Time* (JIT), apresentado-o como uma versão melhorada da produção de larga escala americana. Esse conceito visa produzir o produto necessário, no momento certo, na quantidade certa, eliminando todas as ações desnecessárias. Entretanto, quando Kiichiro coloca em prática o seu novo paradigma de produção eclode a II Guerra Mundial, obrigando-o a substituir a produção de automóveis pelo fabrico de camiões que serviriam na Guerra (Womack, et al., 1990).

O fim do conflito, revela um Japão derrotado e arrasado, tanto no seu poderio bélico como no seu complexo industrial (Barretto, 2012), enquanto os EUA emergem como uma grande potência mundial. Face à escassez de recursos e da intensa concorrência doméstica do mercado de automóveis, o Japão precisava urgentemente de se recuperar. Perante esta situação, Kiichiro Toyota juntamente com Eiji Toyoda e Taiichi Ohno, chefe da fábrica e especializado no aumento da produtividade, reformularam e adaptaram as ideias praticadas por Henry Ford nos EUA à *Toyota*. Além disso, Ohno percebeu que para colocar o JIT em prática seriam necessárias alterações revolucionárias nos processos de produção. A partir daí idealizaram um método de produção inspirado nos supermercados americanos, onde o processo posterior buscava o material no processo anterior. Entretanto, para que esse sistema funcionasse com perfeição era necessário a colaboração de todos os operadores, que inicialmente ofereceram alguma resistência à aplicação desse novo sistema, devido aos hábitos já adquiridos. Taiichi Ohno que liderou grande parte do trabalho inicial na *Toyota* para a fabricação de motores de automóveis durante a década de 50 responsabilizou-se por treinar pessoalmente os funcionários no chão de fábrica, reafirmando a importância dos dois principais pilares da Toyota: o JIT e *Jidoka* (autonomation) (Ohno, 1988).

Essa nova abordagem para a produção que ficou conhecida como *Toyota Production System* (TPS) (Ohno, 1988), representou um modelo alternativo ao da produção em massa (com seus grandes lotes, ativos e "desperdícios ocultos" (Hines, et al., 2004) e iria conquistar o mundo na década de 70, devido aos méritos e resultados obtidos através de uma gestão eficiente (Correa, 2007). As ideologias do TPS e os seus conceitos adjacentes como, por exemplo, a melhoria contínua ou *Kaizen*, o método *Kanban* e o respeito pelas pessoas, alastram-se rapidamente, inicialmente entre as empresas japonesas, e mais tarde pelo resto do mundo. No entanto, foi necessário quase uma década para que a primeira literatura inglesa abordasse este tema (Hall, 1983).

Motivados pelo desempenho superior obtido pelas indústrias japonesas em comparação com o desempenho dos sistemas de produção em massa tradicionais, os fabricantes ocidentais replicaram as técnicas e ferramentas estruturantes do TPS, porém encontraram dificuldades para introduzir a cultura organizacional requerida na sua implementação. Nessa fase de

aprendizagem, a visão limitada e o foco nas ferramentas, em detrimento dos aspectos humanos, comprometeram os resultados esperados na implementação da abordagem de alto desempenho desenvolvida pela TPS (Hines, et al., 2004).

Durante a década de 90, com a disseminação do termo “*Lean Production*” a Toyota foi considerada a marca mais “eficiente e que produzia veículos da melhor qualidade em todo o mundo” (Womack, et al., 1990). Nesse contexto, estudiosos começaram a decifrar as técnicas descritas em Sugimori, et al. (1977) e Womack, et al. (1990) como o *Kanban*, o JIT e os círculos de qualidade. O conceito iniciou então uma gradual evolução incorporando novos princípios que envolviam a identificação de valor para o cliente, a gestão do fluxo de valor, o desenvolvimento da capacidade de fluxo de produção, o uso de mecanismos *Pull* para suportar o fluxo de materiais em operações restritas e finalmente a busca da perfeição através da redução a zero de todos os tipos de desperdícios no sistema de produção (Womack & Jones, 1996). Essa fase de disseminação do conceito, foi logo seguida por uma fase de implementação generalizada, graças à repercussão dos resultados positivos obtidos por grandes organizações. A publicação do livro *Lean Thinking* (Womack & Jones, 1996) também contribuiu para ajudar as organizações a entenderem a abordagem estratégica e planejar a mudança em toda a organização (Lewis, 2000).

Nesse estágio, inúmeros artigos continuaram a explorar os benefícios e as críticas à implementação da LP (Dean Jr. & Snell, 1996; Edwards, 1996; White, et al., 1999). Surgem na literatura estudos empíricos empregando métodos de pesquisa quantitativos e qualitativos que vão contribuir para a tão necessária base de conhecimento do pensamento *Lean* (Lewis, 2000). Inicialmente, os princípios Lean são implementados apenas ao nível operacional com o objetivo de melhorar a produtividade e reduzir a não agregação de valor das atividades (Stone, 2012). Após a sua implementação bem-sucedida e com a intensificação da competitividade global, Womack & Jones (1994) propõem um conceito chamado *Lean Enterprise* (LE) com o objetivo de expandir a aplicação dos princípios *Lean* das atividades de chão de fábrica para toda a organização, como por exemplo em atividades de *Supply Chain Management* (SCM) ou no desenvolvimento de produtos e integrar o conceito da LP a todas as dimensões de negócios da organização.

A ascensão da *Toyota Motor Company* como o principal fabricante de automóveis no mundo, ultrapassando a *General Motors*, contribuiu para o aumento da literatura a partir de 2006. Nessa fase, considerada a fase do desempenho por Stone (2012), trabalhos com abordagens centradas nos resultados de desempenho em organizações “*Lean*” dominaram a literatura, tentando aumentar a credibilidade de medidas tradicionais de desempenho tipicamente expressas em formas associadas com a qualidade, o custo, a entrega e a segurança (Shah & Ward, 2007).

Conforme referido anteriormente, o TPS passou por um longo processo de aprendizagem e refinação dos processos de produção ao longo dos últimos 40 anos. Essas quatro décadas de mudanças organizacionais comprovaram que, apesar do *Lean* não estar desprovido de interrogações e controvérsias, os métodos de produção em massa, empregados desde o início do século XX, necessitavam de ser repensados através de uma abordagem inovadora e flexível proposta pela filosofia TPS.

A conquista da *Toyota* foi verdadeiramente brilhante, à medida que encontrou gradualmente formas para combinar as vantagens dos pequenos lotes de produção com as economias de escala na produção. No entanto, a formulação de um dos mais influentes paradigmas de produção dos últimos tempos não se deveu apenas à imaginação empresarial dos gestores de produção da *Toyota*, Kiichiro Toyoda, Taiichi Ohno, e Eiji Toyoda, mas sim a uma combinação de vários elementos do sistema Ford com as ideias originais desses génios da indústria automobilística japonesa. Assim, pode-se dizer que o estilo *Toyota* não foi inteiramente original nem totalmente imitativo. É essencialmente híbrido (Holweg, 2007).

2.3. Princípios

Além do foco na redução/eliminação de desperdícios e no cliente, a adoção da filosofia (abordagem) *Lean* implica qualidade à primeira, melhoria contínua e resolução de problemas. Numa organização “*Lean*” essas características são suportadas pelas pessoas. Eiji Toyoda utilizava a expressão “*before cars, make people*” evidenciando a importância daqueles que faziam os carros e daqueles que se serviam dele. As pessoas são o mais importante e decisivo elemento da organização, pois são elas quem têm as melhores condições para solucionar os problemas, uma vez que são conhecedoras de cada etapa do processo (Smith & Hawkins , 2004). Para tal, os funcionários, em todos os níveis da organização, devem ser treinados e estar envolvidos em toda a implementação de ferramentas no ambiente de produção, de forma a chegarem a um consenso sobre a nova maneira de trabalhar. Alcançar os benefícios dessa abordagem não é uma tarefa fácil. Uma implementação bem-sucedida exige o compromisso e o suporte da direção e a participação ativa de todo o pessoal de uma organização (Smith & Hawkins , 2004).

À vista disso, com o objetivo de melhorar a compreensão da filosofia *Lean*, Womack & Jones (1996) no seu livro intitulado “*Lean Thinking*”, analisaram várias práticas adotadas pela TPS. Nessa análise foram identificados cinco princípios que podem servir como um guia de referência e apoiar as organizações que pretendem trilhar esse caminho. Em seguida esses princípios são descritos na sequência em que devem ser implementados.

1. Criar valor

Para o *Lean Thinking*, valor é tudo aquilo pelo qual o cliente está disposto a pagar, ou seja, a noção de valor não é uma decisão interna da empresa, tão pouco da direção da mesma. O valor considerado pelo *Lean Thinking*, vem única e exclusivamente do cliente e é expressão das necessidades e desejo deste (Womack & Jones, 2004). Por isso, a empresa necessita conhecer em detalhe o que cada um dos seus *stakeholders* valoriza. Só desta forma a organização poderá identificar o valor e o desperdício. Alguns exemplos de valor percebido pelos clientes são: o preço, a qualidade, o prazo de entrega, o atendimento prestado e as características específicas diferenciadoras.

2. Definir a cadeia de valor

Definir para cada produto e/ou serviço e para cada *stakeholder* a respetiva cadeia de valor. A cadeia de valor é o conjunto de todas as ações específicas requeridas para conduzir um produto e/ou serviço através das três tarefas críticas de qualquer negócio:

- Resolução de problemas, desde a conceção até ao lançamento em produção;
- Gestão da informação, desde a receção da encomenda até à entrega;
- Transformação física, desde a matéria-prima até ao produto acabado nas mãos do cliente (Womack & Jones, 2004).

É fundamental nessa fase separar os processos em três categorias: os que efetivamente geram valor, aqueles que não geram valor, mas são importantes para a manutenção dos processos e da qualidade, e aqueles que não agregam valor, devendo por isso ser eliminados. Dessa forma, será possível identificar e mapear com precisão o fluxo de valor do produto, identificando os desperdícios em cada processo, e assim implementar ações para eliminá-los.

3. Otimizar o fluxo

Otimizar o fluxo consiste em encontrar a sequência ideal de etapas que criam valor para cada um dos *stakeholders*. Deve-se ver o processo global em toda sua complexidade para que seja definida uma nova divisão de tarefas e etapas visando a consolidação do fluxo (Womack & Jones, 2004).

O objetivo do fluxo é eliminar todos os possíveis pontos de estrangulamento, sincronizando todos os meios envolvidos: fluxo de materiais, de pessoas, de informação e de capital de forma a se obterem fluxos contínuos, sem interrupções, os quais poderiam ser traduzidos em desperdícios.

4. O sistema *Pull*

Segundo este princípio um produto ou a prestação de serviço deve ser iniciada apenas quando solicitado pelo cliente, ou seja, somente os pedidos do cliente devem desencadear os processos. Logo, as organizações não podem produzir o que julgam que o cliente venha a necessitar (*just in case*), mas sim o que efetivamente é pedido, na quantidade e no momento exato (*just in time*).

Ao atingir o fluxo contínuo, obtém-se as reduções dos *lead times* às necessidades do cliente, que se traduzem no aumento da confiabilidade dos processos e dos clientes. Isto é, ao “puxar” a produção, em vez de “empurrar”, os *stocks* excessivos são reduzidos, acrescentando valor ao produto e causando ganhos em produtividade.

5. Busca pela perfeição

A perfeição deve ser o objetivo constante de todos envolvidos na cadeia de valor. Após a implementação integrada dos princípios anteriores surgem novos desperdícios e novos obstáculos ao fluxo de valor, criando-se oportunidades de melhoria. A busca do aperfeiçoamento contínuo em direção a um estado ideal deve orientar todos os esforços da empresa, em processos transparentes nos quais todos os membros da cadeia tenham conhecimento profundo do processo como um todo, podendo dialogar e melhorar continuamente em busca da perfeição. Para isso, a empresa pode contar com as metodologias de melhoria contínua (*Kaizen*), o ciclo PDCA (*Plan; Do; Check; Act*), entre outras.

Entretanto, os cinco princípios destacados por Womack & Jones (1996) contêm algumas lacunas, na medida em que consideram apenas a cadeia de valor do cliente, ignorando o facto de que numa organização coexistem várias cadeias de valor, mais especificamente, uma para cada fornecedor. Outra limitação é que o foco nesses princípios pode levar as organizações a concentrarem os seus esforços somente na eliminação de desperdícios, em prejuízo do propósito de criar valor para todas as partes interessadas. Perante isso, a *Comunidade Lean Thinking* através de Pinto (2009) propôs a revisão dos cinco princípios *Lean Thinking*, sugerindo a adoção de mais dois princípios, “Conhecer os *Stakeholders*” e “Inovar Sempre”. A ideia subjacente é que somente depois de conhecer em detalhe todos os *stakeholders* e compreender o que é valor para cada um deles, será possível identificar e eliminar os desperdícios através da melhoria contínua dos processos. O princípio “Inovar sempre” torna-se igualmente importante uma vez que as expectativas dos diferentes *stakeholders* estão em constante evolução. As empresas precisam estar atentas à dinâmica dessas mudanças a fim de definir seus objetivos estratégicos e à sua visão do futuro. Sem essa visão do futuro, não existe inovação.

Os sete princípios *Lean Thinking* estão representados na Figura 2.

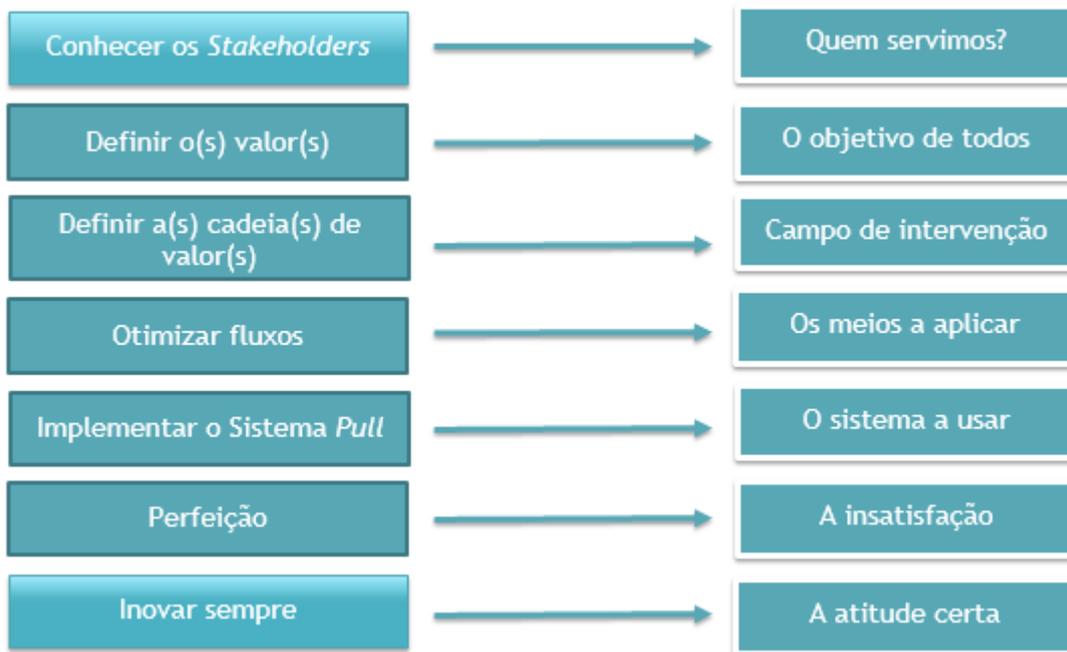


Figura 2. Os sete princípios *Lean thinking* (Pinto, 2009)

Existem ainda outros princípios que as empresas devem adotar como práticas diárias para se tornarem uma organização de aprendizagem. Estes princípios foram descritos por Jeffrey K. Liker no livro “*The Toyota Way*” (2004) e são o resultado de um longo período de observação direta e entrevistas com representantes de todos os setores da *Toyota*, no Japão e nos EUA.

Os 14 princípios sugeridos por Liker (2004) estão descritos abaixo:

1. Basear as decisões de gestão numa filosofia de longo prazo, mesmo que isso obrigue a comprometer os objetivos financeiros a curto prazo. Este princípio é a base para todos os outros e está incorporado na missão da *Toyota*;
2. Criar um processo de fluxo contínuo. Estabelecer processos que combinam homens, máquinas e materiais para produzir produtos de qualidade 100% quando são necessários. Para isso, é necessário eliminar/reduzir os desperdícios e trazer os problemas à superfície;
3. Usar o sistema *Pull*. O sistema *Pull* faz uso do JIT para responder à procura do cliente. Estratégias de controlo da produção são amplamente utilizadas (por exemplo, sistemas *Kanban*) para harmonizar a produção com a procura e limitar os inventários nos processos.
4. Nivelar a carga de trabalho (*heijunka*). Isso significa atingir o equilíbrio de capacidade e sincronização de todas as operações de produção ao longo do tempo, de modo a que corresponda de forma precisa e flexível à procura dos clientes;

5. Parar e corrigir os problemas imediatamente para obter qualidade logo à primeira. Sistemas de inspeção que fornecem *feedback* imediato, monitorização e controle de fatores que causam problemas de qualidade e mecanismos de deteção e filtragem (Poka-Yoke) são técnicas amplamente empregadas;
6. Trabalhar com padrões. Definir explicitamente as melhores práticas atuais, (mão-de-obra e esforço mínimo, qualidade mais alta, maior segurança) na execução de cada trabalho e comunicá-las à estação de trabalho. A padronização das tarefas é a base da melhoria contínua;
7. Usar o controle visual como um processo de melhoria contínua. Exibir claramente o *status* operacional do sistema de produção para que o trabalho possa prosseguir de forma eficiente e os problemas sejam evidentes para todos. São utilizadas técnicas como 5S, *displays* de inventário e *Andon*.
8. Utilizar somente tecnologia confiável e exaustivamente testada que sirva as pessoas e os processos;
9. Promover líderes que conheçam completamente o seu trabalho, vivam a filosofia e ensinem isso aos outros;
10. Desenvolver pessoas e equipas excepcionais que sigam a filosofia da organização. Promover o trabalho em equipa e líderes que facilitem o seu trabalho.
11. Respeitar a rede de parceiros e fornecedores. Estabelecer parcerias de longo prazo e trabalhar em conjunto para atingir os objetivos comuns;
12. Vá e veja por si mesmo (*genchi genbutsu*). Não baseie a sua opinião num monitor, vá até ao chão de fábrica e converse com os operadores.
13. Tomar decisões devagar e por consenso, considerando verdadeiramente todas as opções e implementar as decisões rapidamente. Sem o consenso dos operadores de chão de fábrica as ferramentas nunca serão implementadas adequadamente.
14. Use a reflexão (*hansei*) e a melhoria contínua (*kaizen*) para se tornar uma organização de aprendizagem.

O que este estudo do modelo TPS revela é que o que torna o modelo de produção e gestão da *Toyota* mundialmente reconhecido, não são os seus elementos individuais (filosofia, práticas e ferramentas), mas sim a adoção de uma abordagem global capaz de integrar pessoas, processos e tecnologia num esforço coordenado para a mudança e aprendizagem em toda a organização (Liker & Morgan, 2006). São as sinergias obtidas através dessa integração que vão possibilitar aumentar os ganhos em produtividade e qualidade, bem como assegurar a sustentabilidade dos resultados.

2.4. Desperdícios

A filosofia *Lean* centra-se em reduzir ou eliminar desperdícios (*Muda* em japonês) para aumentar o valor para o cliente final. Nessa perspectiva, Womack & Jones (2004) definem desperdício como qualquer atividade humana que absorve recursos, mas que não cria qualquer tipo de valor. Aqui, é importante ressaltar que a percepção do que é valor deve ser sempre estipulada pelo cliente, pois é ele quem vai usufruir do produto ou serviço final.

Nota-se que a definição de desperdício está intrinsecamente ligada ao conceito de valor. Logo, uma forma de reconhecer os desperdícios é identificar todas as ações, etapas, materiais e processos que os *stakeholders* não valorizam ou reconheçam como úteis (Pinto, 2009) e, portanto, não estão dispostos a pagar. Essas atividades aumentam o consumo de recursos e tempo que recaem sobre os custos dos produtos ou serviços, tornando-os mais dispendiosos do que deveriam ser.

Segundo Hines & Taylor (2000) os desperdícios podem ainda ser classificados em “desperdícios necessários” e “desperdícios não necessários”. Os “desperdícios necessários” são aqueles que não podem ser eliminados pois são inerentes ao processo, portanto devem ser reduzidos por exemplo, nas inspeções de matéria-prima e na realização de *setups*. Enquanto que os “desperdícios não necessários” podem ser eliminados conforme as circunstâncias do processo por exemplo, nas paragens por avarias e deslocamentos desnecessários.

Para os criadores do TPS, Taiichi Ohno e Shigeo Shingo, são recorrentes numa organização sete categorias de desperdícios (*Muda*). Esses desperdícios são: a sobreprodução, as esperas, o transporte, os processos, os *stocks*, os defeitos e os movimentos. A esta lista, investigadores da comunidade *Lean* adicionaram uma oitava categoria de desperdício, as pessoas subutilizadas (Locher, 2008).

Estes oito desperdícios são explicados individualmente a seguir.

1. Sobreprodução - Representa a produção excessiva, isto é, quando se produz mais do que o necessário ou antes do momento necessário. Algumas das consequências desse desperdício são a utilização desnecessária de recursos (máquinas, matérias-primas e energia); aumento dos *stocks* e dos custos da sua manutenção; falta de coordenação entre os postos de trabalho, provocando a redução da flexibilidade, etc.
2. Esperas - É o tempo em que um recurso, máquina ou operador está à espera para entrar em produção. Vários fatores podem originar esse desperdício como por exemplo: avarias nos equipamentos, acidentes ou defeitos de qualidade, problemas de *layout*, tempo de *setup* elevados, atrasos nas entregas, etc.

3. Transporte - Está relacionado com as movimentações desnecessárias de materiais entre as operações, desde o fornecedor até o cliente final. Algumas iniciativas podem ajudar a reduzir ou eliminar esse desperdício, como por exemplo, a utilização de células de trabalho, o sistema *Pull* ou operadores e equipamentos flexíveis e com habilidades multifuncionais.
4. Sobreprocessamento - São etapas ou esforços que não agregam qualquer valor ao produto. Pode ser originado por falta de competência e formação dos operários, utilização de ferramentas e equipamentos de forma incorreta, falta de padronização das tarefas, etc.
5. *Stocks* - Os *stocks* é a raiz de todos os problemas nos sistemas de produção, pois podem ocultar uma grande variedade de desperdícios que devem ser conhecidos e analisados. Esse desperdício pode representar discontinuidades nas operações; tempos elevados de mudança de ferramentas; existência de gargalos ou estrangulamentos nos processos; problemas de qualidade, entre outros.
6. Defeitos - Estão associados a problemas na qualidade dos produtos ou serviços que se traduzem em custos de inspeção e reparação. Além disso, quando são detetados pelo cliente final, podem acarretar custos associados ao tratamento das reclamações, garantias e entregas adicionais, bem como comprometer a fidelidade do cliente.
7. Movimento - Refere-se às deslocações ou movimentações dos operadores que não acrescentam valor ao produto. As causas mais comuns são falta de limpeza e organização dos postos de trabalho, *layouts* incorretos, incorreta ergonomia da sequência das operações de trabalho, falta ou insuficiente formação e treino das pessoas, capacidades e competências não desenvolvidas e instabilidade nas operações.
8. Pessoas Subutilizadas - Não utilizar plenamente o capital intelectual da organização. As funções atribuídas aos colaboradores são muitas vezes limitadas, não aproveitando a totalidade das suas aptidões e habilidades. As principais causas desse desperdício são: não ouvir as pessoas envolvidas diretamente no trabalho sobre as suas percepções; não as envolver na identificação e resolução dos problemas com os quais lidam diariamente; limitar o acesso à informação, etc.

Além do *Muda*, mais dois termos são utilizados frequentemente pelos colaboradores do TPS para descrever práticas que geram desperdícios nos sistemas produtivos. Estas são expressas em termos de *Mura* e *Muri*:

- *Mura* - refere-se às inconsistências ou instabilidades na produção. Representa o desnivelamento ou o não balanceamento do trabalho dos operários ou das máquinas. Pode ser evitado aplicando-se o conceito de *JIT*, pois além de manter o *stock* reduzido, possibilita estabelecer um rígido controlo dos produtos de forma a fornecer ao cliente peças no momento certo, na hora certa e na quantidade certa.
- *Muri* - sobrecarga de equipamentos ou operadores devido ao *Muda* e *Mura*, exigindo que operem a um ritmo mais intenso, por um período maior de tempo do que podem suportar. Para a eliminação deste desperdício é necessário padronizar o trabalho, garantido que todos sigam o mesmo procedimento, o que tornará os processos mais previsíveis, estáveis e controláveis (Pinto, 2009).

A figura 3 representa um exemplo de como *Muda*, *Mura* e *Muri* estão inter-relacionados e, portanto, devem ser considerados simultaneamente. A situação ideal é a situação em que não existe *Muda*, *Mura* ou *Muri* de forma a promover uma distribuição uniforme, sem desperdícios ou sobrecargas.

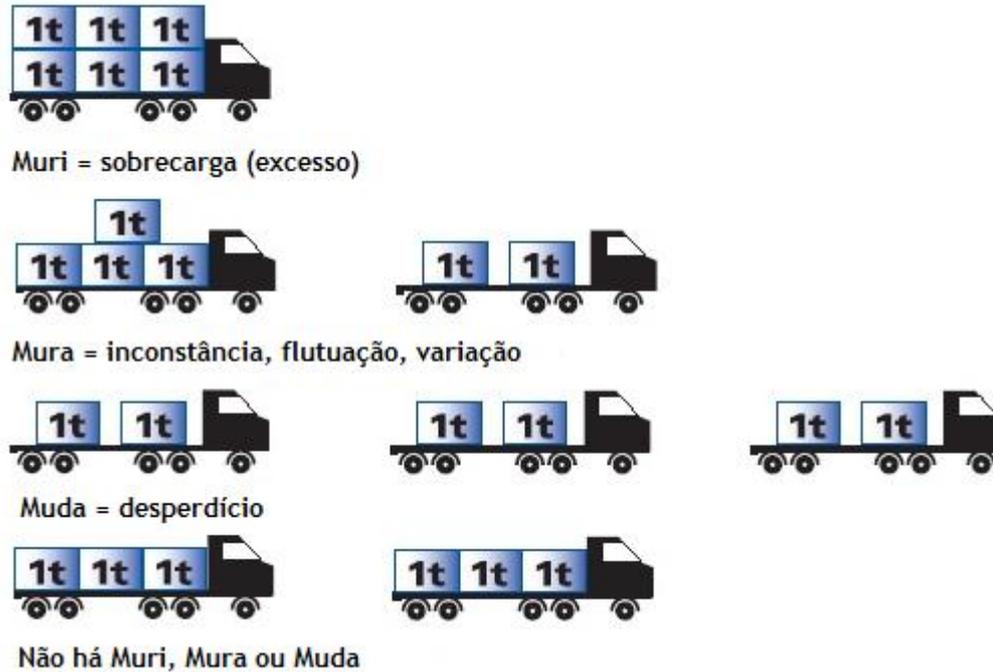


Figura 3. Representação Muda, Mura e Muri (Lean Institute Brasil)

2.5. Ferramentas

O êxito da abordagem *Lean* deve-se em grande parte à sua alta eficiência em reduzir a complexidade e evitar etapas dos processos que não criam valor (Jasti & Kodali, 2015).

Para implementar a filosofia LP diversas ferramentas foram estudadas e desenvolvidas ao longo dos anos. Estas ferramentas podem ser encontradas através de uma variedade de nomes, sobrepostas a outras ou até mesmo uma ferramenta específica com um método de implementação diferente, proposto por diferentes investigadores (Pavnaskar, et al., 2003).

Contudo, o domínio sobre estas ferramentas não garante o sucesso da implementação do pensamento *Lean*, dado que a essência desta filosofia de gestão não está nas soluções que preconiza, mas sim em aspetos menos tangíveis, como a cultura organizacional, a liderança de pessoas e a gestão dos processos (Pinto, 2009).

A Tabela 1 apresenta algumas das ferramentas frequentemente referenciadas na literatura (Jasti & Kodali, 2015; Negrão, et al., 2017). No entanto, no contexto deste trabalho, face ao seu objetivo, serão selecionadas apenas as ferramentas *Lean* que, podem dar uma melhor resposta à integração com as tecnologias da I4.0. Essas ferramentas estão a negrito na tabela e serão descritas sucintamente a seguir.

Tabela 1. Exemplos de Técnicas e Ferramentas *Lean*

5'S	Elimination of Waste	Just in Time (JIT)	Pull System	Tack Time
Andon	Heijunka (Level Scheduling)	Kaizen (Continuous Improvement)	Single-Minute Exchange of Die (SMED)	Total Productive Maintenance (TPM)
Continuous Flow	Jidoka (Autonomation)	Kanban	Supplier Development	Value Stream Mapping
Cellular Layout	Jidoka (Autonomation)	Poka-Yoke (Error Proofing)	Standardized Work	Visual Factory

Continuous Flow é o movimento ordenado e contínuo dos materiais ao longo do sistema produtivo e ao ritmo dos pedidos dos clientes. Para que isso seja possível, a informação e os materiais necessários devem ser entregues no momento, na quantidade e local corretos. De

acordo com Liker & Morgan (2006) o objetivo é eliminar os tempos de espera entre as etapas de produção e reduzir as distâncias de deslocamento. Ele contribui significativamente para a redução dos *lead times* de produção, *stocks*, custo das operações, além de eliminar as perdas das operações (Liker & Morgan, 2006).

O uso da ferramenta *Just in time* (JIT) implica que os produtos devem ser fabricados no momento, na quantidade e no tempo exato em que foram solicitados pelo cliente. O objetivo dessa ferramenta é a completa eliminação do desperdício através do início dos processos apenas quando são requisitados. Considerado um dos pilares da TPS, a implementação desse sistema permite a eliminação de atividades que não acrescentam valor (como esperas e transportes), a diminuição de *stocks* e *Work in Progress* (WIP), a redução de defeitos e dos custos de produção (Monden, 1998).

O termo *Kanban* vem do Japonês e quer dizer “registro” ou “cartão visual”. É um sistema simples em que o movimento de materiais entre estações de trabalho numa linha de produção é baseado em cartões. Segundo esse sistema um fornecedor só deve entregar recursos para a linha de produção quando estes forem requisitados, de modo a que não haja *stocks*, evitando assim o desperdício. O sistema *kanban* desempenha um papel vital na produção e no desenvolvimento do fluxo dos produtos. Com o advento do desenvolvimento tecnológico, os tradicionais cartões *Kanban* estão a ser substituídos por *Kanbans* electrónicos (*eKanban*). A vantagem do *eKanban* é que elimina os erros humanos causados pela comunicação através da circulação de papel tornando a gestão da produção mais eficiente.

Num sistema de produção *Lean*, a produção é gerida por um sistema *Pull*. Ao contrário do sistema *Push* (empurrar), que é baseado nas previsões de procura dos clientes, no sistema *Pull* cada estação de trabalho “puxa os materiais” da estação anterior na presença de um pedido da estação seguinte (Pinto, 2009). Este sistema traz vantagens em relação ao método de “empurrar” nomeadamente no que se refere à redução de custos devido à produção de *stocks* extras, armazenamento, etc.

O termo *Poka-Yoke* que traduzido do japonês significa “à prova de erros” refere-se a atividades de identificação e prevenção de causas prováveis de erros ou defeitos nos processos (Pinto, 2009). O objetivo do *Poka-Yoke* é eliminar problemas associados a defeitos e erros assim que estes forem detetados, de modo a que um erro não se propague para o processo seguinte, causando desperdícios de tempo e dinheiro. O sucesso da implementação desta ferramenta deve-se em grande parte à responsabilidade dos operários, na medida em que são eles que devem entregar os produtos sem defeitos aos processos seguintes ou parar a produção imediatamente quando estes forem identificados.

A metodologia SMED, ou *Single-Minute Exchange of Die*, é uma técnica de análise e redução de tempos de configuração que tem o mesmo objetivo de toda a filosofia *Lean*, reduzir os desperdícios da produção. Esta metodologia permite alterar um produto numa linha de produção de forma rápida e efetiva. Também conhecida como “Troca Rápida de Ferramentas”, esta técnica permite uma maior flexibilidade, pois consegue responder efetivamente às mudanças nas necessidades de produção, ao mesmo tempo em que reduz os custos. Desenvolvida inicialmente por Shingo (1985), a SMED estabelece a distinção entre duas categorias de operações de configuração, a configuração interna e a configuração externa. A interna refere-se a todas as operações que podem ser realizadas enquanto a máquina estiver parada (por exemplo, montagem ou desmontagem de ferramentas) e a configuração externa inclui todas as operações que não implicam a paragem da máquina (por exemplo, transportar ferramentas para a máquina e da máquina ao armazenamento). Depois de ser realizada a distinção entre as operações internas e externas, o objetivo é converter as configurações internas em configurações externas para realizar um maior número de atividades com a máquina em operação a fim de reduzir os tempos de paragens ao mínimo e, conseqüentemente, os tempos de configuração. Esta metodologia permite a fabricação de lotes menores, redução de *stocks* e melhoria da capacidade de resposta ao cliente.

A ferramenta *Supplier Development* refere-se aos esforços para que todos os parceiros da cadeia de valor se possam desenvolver em conjunto com o seu fabricante. A fim de aumentar o seu desempenho e as capacidades de produção, os fabricantes devem empenhar-se em envolver os fornecedores em todos os processos e práticas operacionais criando um ambiente favorável para a manutenção de relacionamentos de longo prazo.

O *Value Stream Mapping* (VSM) é uma ferramenta gráfica mundialmente famosa que permite visualizar o percurso de um produto ao longo de toda a sua cadeia de valor. Dessa forma ajuda a esclarecer e analisar o fluxo de trabalho de modo a identificar as atividades que não agregam valor ao produto final, contribuindo para reduzir o tempo de espera, o tempo de filas, o tempo de movimentação e outros desperdícios similares (Gupta & Jain, 2013). Nash & Poling (2008) identificam três etapas principais durante a elaboração do VSM:

- Mapa do estado atual: é a representação visual de cada processo no fluxo do material. Nesta etapa serão identificados todos os entraves ao fluxo *Lean*, diagnosticando as condições do sistema e conduzindo a ações de melhorias;
- Mapa do estado futuro: representa a cadeia de valor após a implementação das melhorias, procurando refleti-las nos processos já com as respetivas reduções dos desperdícios;
- Plano de implementação: fornece soluções ou alternativas para alcançar o estado futuro, apresentando os prazos e os objetivos das mesmas.

2.6. Barreiras e Benefícios na Implementação *Lean Production* (*Status Quo*)

A *Lean Production* é um dos paradigmas mais inovadores da fabricação. Desde a sua criação até os dias de hoje, estudiosos têm-se empenhado em compreender os seus princípios e metas, enquanto os profissionais buscam operacionalizar e aplicar seus conceitos no chão de fábrica. Ao longo destes quarenta anos de investigação, definição e escopo evoluíram, acarretando em uma diversidade de interpretações. Como referido por Bhamu & Sangwan (2014), a LP pode ser um caminho, um processo, um conjunto de princípios, uma abordagem, um conceito, uma filosofia, um sistema, um programa ou um paradigma.

Hines, et al. (2004) argumentam que para entender o *Lean* como um todo é crucial fazer distinção entre os níveis estratégico e operacional. O nível estratégico com foco no cliente (Womack & Jones, 1996) está relacionado com os princípios orientadores e objetivos globais da filosofia *Lean*, sendo aplicável em toda a organização. Já o nível operacional é entendido como um conjunto de práticas de gestão, ferramentas, ou técnicas que podem ser observadas diretamente (Shah & Ward, 2003). Isto conduz frequentemente a uma confusão sobre onde se devem aplicar os preceitos *Lean*. A resposta para mitigar essas incertezas e aproveitar todos os benefícios desta abordagem é trabalhar de forma sinérgica e consistente, identificando e eliminando as barreiras que se apresentam de forma a criar um ambiente altamente integrado que permita acrescentar valor para o cliente final ao mesmo tempo em que reduz os desperdícios (Hines, et al., 2004).

Embora, na literatura, existam metodologias específicas para o sucesso na implementação dessas práticas, a existência de um *framework* que forneça um quadro padrão a ser seguido ainda é escasso (Stone, 2012). Isto acontece porque os contextos organizacionais vivenciados pelas empresas são diferentes, de forma que não existe uma única boa solução para alcançar um desempenho superior. De acordo com Bhasin & Burcher (2006), a implementação bem-sucedida do *Lean* só se pode materializar quando ele não é tratado unicamente como uma estratégia, mas como uma filosofia que envolve grandes mudanças na organização, não só no chão de fábrica, mas na organização como um todo. Outros autores (Shah & Ward, 2003) também concluíram que as empresas com uma cultura organizacional desenvolvida são típicas de empresas com implementação bem-sucedida de práticas *Lean*. Para alcançar a melhoria nos processos, essas mudanças devem ser encomendadas pela Gestão de topo, que deve atuar de forma sistemática na sensibilização e envolvimento dos trabalhadores em todos os processos da organização. Muitos autores (Jasti & Kodali, 2015; Negrão, et al., 2017) observaram que quando os objetivos da LP não estão claros é muito difícil obter dados operacionais precisos por parte dos trabalhadores. Além disso, estes costumam oferecer resistência quando o objetivo é implementar alterações na sua rotina de trabalho.

Hoje, já é amplamente reconhecido que diante dos mesmos constrangimentos e recursos, as organizações que adotam os métodos de produção *Lean* ganham vantagens competitivas significativas em relação às que ainda não o praticam. Estas vantagens recaem nomeadamente sobre os sistemas de distribuição, as comunicações de informação, o transporte, as relações cliente-fornecedor e o desempenho de entrega em tempo útil (Wu, 2003), para além dos custos e na qualidade dos produtos ou serviços oferecidos.

Essa lista de benefícios intensificou o interesse pela investigação e implementação da LP, fazendo com que o número de artigos publicados disparasse a partir de 2007. A recessão vivenciada pelos mercados nessa época, também contribuiu para o aumento das publicações, uma vez que forçou os investigadores e as organizações a procurarem soluções para reduzir os custos da produção.

A partir deste momento, as investigações em LP que até então se centravam na indústria automóvel, influenciadas pelo sucesso da TPS, começaram a expandir-se para outros setores. Atualmente, esta abordagem é adotada por outras indústrias, incluindo têxteis, construção, serviços, indústria alimentar, equipamentos médicos, elétricos e eletrónicos, indústria cerâmica, mobiliário, serviços, etc. Os seus conceitos e práticas estão a ser aplicados em todos os sistemas organizacionais, dos cuidados de saúde, aos recursos humanos, ao ensino superior, entre outros (Martinez , et al., 2016).

Diante da relevância do tema, alguns autores (Bhamu & Sangwan, 2014; Jasti & Kodali, 2015; Negrão, et al., 2017), realizaram revisões sistemáticas da literatura existente, empenhados em tentar explicar o carácter multifacetado do sistema de produção *Lean*. Esses estudos revelaram que a investigação em LP é realizada em todo o mundo. Contudo, a maior parte dos artigos publicados pertencem a países desenvolvidos, como os EUA e o Reino Unido, e abordam os problemas desses países. A Espanha, a Índia e o Japão também surgem entre os países com publicações significativas sobre o assunto.

Ainda de acordo com os mesmos autores, as organizações utilizam uma infinidade de ferramentas com os mais diversos propósitos, como por exemplo, reduzir os desperdícios. Muitas delas são usadas em conjunto a fim de se obterem melhores resultados. Entre as ferramentas mencionadas destacam-se: o *Value Stream Mapping* (VPM), o *Kaizen*, o *Kanban*, o *Pull System*, o *JIT*, o *Total Productive Maintenance* (TPM), o *Total Quality Management* (TQM), o *Single Minute Exchange of Die* (SMED), os 5'S, o *Cell Layout*, o *Poka-Yoke*, o *Heijinka* e o *Setup Reduction*. Todavia, a maior parte dos artigos publicados focam-se em eliminar alguns desperdícios, ao invés de os reduzir a todos. Os desperdícios mais citados são os *stocks* e os defeitos, uma vez que ambos influenciam diretamente os custos do produto. Esse pode ser um dos motivos porque muitas organizações que se empreenderam na jornada *Lean* não foram capazes de sustentar os seus resultados (Mohanty, et al., 2007). Os estudos

demonstram que para alcançar os benefícios desejados, a abordagem LP deve ser implementada em toda a organização, e não de forma fragmentada em alguns processos ou operações.

A LP também está frequentemente associada a outras abordagens, como o *Enterprise Resource Planning* (ERP), o *Material Requirement Planning* (MRP), o *Agile*, a *Theory of Constraints* (TOC) e o *Six Sigma* (Hines, et al., 2004). Do ponto de vista estratégico, qualquer prática que potencialize o valor fornecido ao cliente final pode ser alinhada com a filosofia *Lean*.

Em resumo, conclui-se, que apesar de ainda existirem barreiras que podem opor-se à implementação da LP, os defensores desse paradigma garantem que quando a filosofia, as ferramentas e os procedimentos estão conectados como um sistema, numa abordagem de aprendizagem a longo prazo, os desafios podem ser superados e os benefícios acumulam-se em todos os níveis da organização (Womack & Jones, 1996).

A Tabela 2 apresenta uma compilação das principais barreiras identificadas na presente revisão bibliográfica e algumas sugestões de soluções para ultrapassá-las.

Tabela 2. Barreiras e Soluções Propostas na Implementação LP

Barreiras	Soluções Propostas
A cultura de um país/empresa. As diferenças culturais referem-se principalmente à resistência interna e à abertura à mudança.	O desenvolvimento da cultura organizacional é considerado um dos precursores para a aplicação dos princípios <i>Lean</i> . Isso requer formação, treino e delegação de responsabilidades em matéria de trabalhadores, o que exige tempo e comprometimento da Gestão de Topo.
Aplicação de ferramentas isoladas, de forma dispersa e fragmentada, desconsiderando a ligação sistêmica necessária para a LP.	LP é um sistema integrado composto de elementos altamente inter-relacionados e uma ampla variedade de práticas de gestão. Sendo assim, a implementação dos princípios <i>Lean</i> deve ser realizada em toda a organização.
Falta de processo/estrutura padrão na implementação da LP.	A investigação através de estudos empíricos e exploratórios levou a muitos quadros com visões divergentes. Há necessidade de maior verificação dos conceitos da filosofia <i>Lean</i> através de estudos de caso e em setores diversificados de forma a melhorar a compreensão do LP tanto pela administração, como pelos trabalhadores. Isso ajudaria gestores a estabelecer uma diretriz ou um passo-a-passo para o desenvolvimento eficaz do seu plano de implementação.
Demanda variável do mercado.	A adoção lenta da filosofia <i>Lean</i> na distribuição gera um conflito devido a necessidade de vincular a produção <i>Pull</i> com a procura variável no mercado. A integração do fornecedor num relacionamento confiável de longo prazo é uma questão importante a ser precedida no comprometimento com a LP.
Dificuldades de implementação por Pequena e Média Empresa (PME). Algumas das razões para o fracasso são: uso de ferramenta errada, uso de uma ferramenta para resolver todos os problemas, falta de compreensão e ambiente de tomada de decisão deficiente.	O apoio externo do governo, fornecedores, clientes e consultores externos poderia melhorar a implementação do <i>Lean</i> na PME.

3. Industry 4.0

3.1. Background

O sector industrial sempre foi crucial para o desenvolvimento económico de cada país. Desde o final do séc. XVII, a indústria tem passado por transformações que revolucionaram a maneira como os produtos são fabricados e trouxeram vários benefícios, especialmente no que refere ao aumento da produtividade (ver Figura 4). A primeira Revolução Industrial foi marcada pela transição do trabalho manual para máquinas alimentadas a vapor. No início do séc. XX, com a introdução da eletricidade nos sistemas produtivos, inicia-se a segunda Revolução Industrial, caracterizada pela produção em massa e a divisão do trabalho. A terceira Revolução que teve início na década de 70 até à atualidade, é caracterizada pelo uso da eletrónica e da tecnologia de informação (TI) para aperfeiçoar a automação na produção (Bitkom; Vdma; ZVI, 2016). Atualmente, a combinação de tecnologias avançadas e da internet está novamente a transformar o paradigma industrial e está a ser designada por quarta Revolução Industrial ou *Industry 4.0* (Lasi, et al., 2014).

A I4.0 é uma estratégia de longo prazo do governo alemão que foi adotada como parte do *High-Tech Strategy 2020 Action Plan*, em 2011 (Kagermann, et al., 2013), para assegurar a competitividade da indústria alemã. Em 2013, o Ministério Alemão da Educação e da Investigação criou um grupo de trabalho constituído por representantes da indústria, do mundo académico e da ciência com o objetivo de promover a investigação e a inovação e acelerar o processo de transferência de resultados científicos para o desenvolvimento de tecnologias comercializáveis (Khan & Turowski, 2016a). Desde então, o governo alemão institucionalizou o seu compromisso com a indústria na criação de uma plataforma liderada pelos Ministérios da Economia e de representantes de negócios, da ciência e dos sindicatos (Hermann, et al., 2016). O primeiro relatório elaborado pela plataforma foi publicado em abril de 2015 e apresentou a utilidade da I4.0 para a economia e sociedade como um dos aspectos-chave a serem explorados no futuro (European Parliament, 2016).

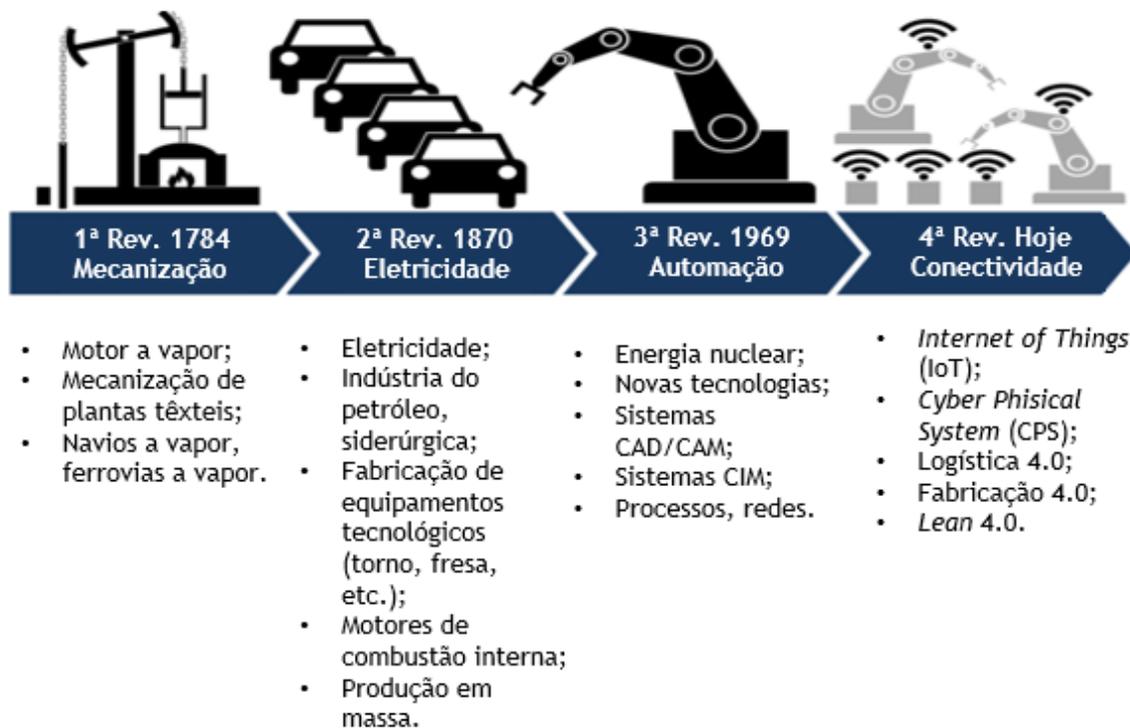


Figura 4. Revoluções Industriais (Adaptado Tamás, et al., 2016; European Commission, 2016)

3.2. Conceitos

Desde que o governo alemão apresentou a I4.0 como uma das suas principais iniciativas para assumir a liderança em inovação tecnológica, inúmeras publicações acadêmicas, artigos, e conferências têm vindo a discutir este tópico (Bauernhansl, et al., 2014). Apesar do grande interesse no tema, não existe ainda uma definição formalmente aceite. Em consequência, podem ser encontradas na literatura múltiplas interpretações para a I4.0.

Khan & Turowski (2016b) descrevem-na como uma revolução sustentada pela aplicação generalizada de tecnologias avançadas ao nível da produção para trazer valor acrescentado e serviços para os clientes e para a própria organização. Para Hermann, et al. (2016), a I4.0 é “um termo coletivo para tecnologias e conceitos de organização de cadeias de valor”. De acordo com Anderl (2015), a I4.0 é uma abordagem estratégica para a integração de sistemas de controlo avançados com tecnologia de internet, o que permite a comunicação entre pessoas, produtos e sistemas complexos.

O tema também é promovido em outras partes do mundo sob os nomes *de Cyber Physical System* (CPS), *Smart Factory*, *Smart Production*, *Machine to Machine* (M2M), *Advanced*

Manufacturing, Internet of Things (IoT), Internet of Everything (IoE) ou Industrial Internet (Bahrin, et al., 2016).

De acordo com Michael , et al. (2015), esta quarta onda de avanços tecnológicos é alimentada por nove tecnologias fundamentais, Figura 5.

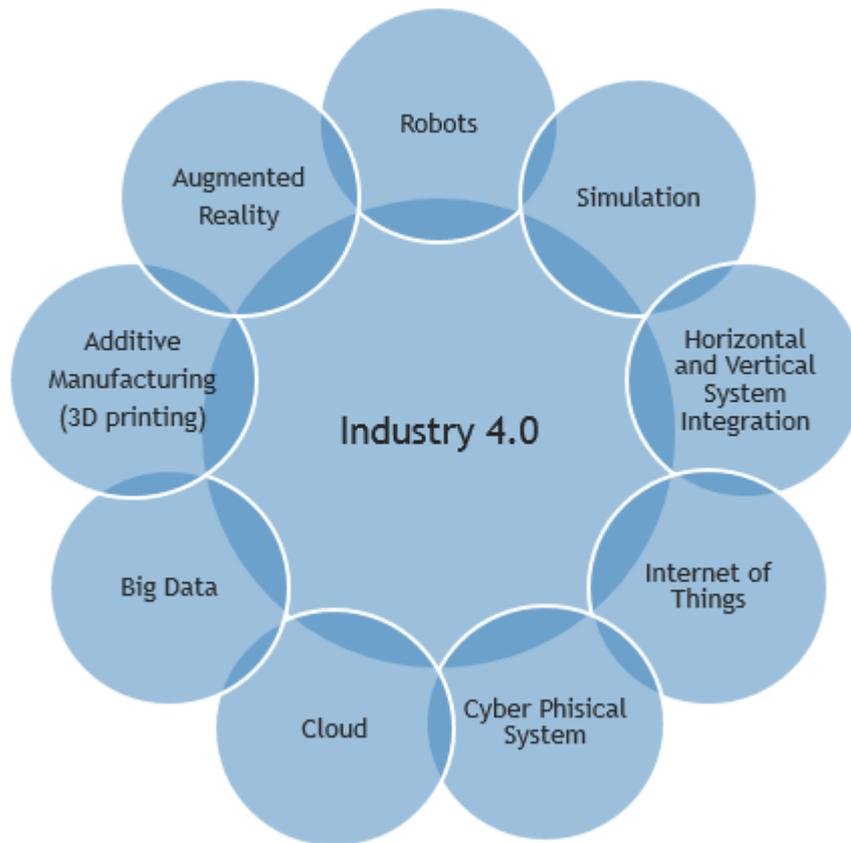


Figura 5. Tecnologias Industry 4.0 (Bahrin, et al., 2016)

Nesse contexto, o CPS inclui objetos “inteligentes” (máquinas, produtos ou dispositivos) que trocam informações de forma autónoma, funcionando em colaboração com o mundo físico ao seu redor. Os produtos “inteligentes”, identificados através de chips de *Radio Frequency identification* (RFID), fornecem informações sobre a sua localização, histórico, status e fluxos. Estas informações permitem que as estações de trabalho “conheçam” quais as etapas de fabricação que devem ser realizadas para cada produto e que se adaptem para executar uma tarefa específica.

Através do CPS os sistemas de produção serão estruturados para que possam responder a quase todas as mudanças do mercado. Isto não só possibilita uma produção de alta velocidade e de acordo com os requisitos específicos de cada cliente, como também otimiza os processos de produção dentro da empresa através de uma rede de cooperação global (Hozdić, 2015).

Tudo isso será facilitado pela IoT. A ideia básica deste conceito é a presença generalizada de uma variedade de “coisas” ou objetos interconectados através de protocolos padrão de internet. De acordo com Sundmaeker, et al. (2010): “As coisas” são participantes ativos em negócios, informações e processos sociais onde são capazes de interagir e de comunicar entre si e com o meio ambiente, trocando dados e informações detetadas sobre o mesmo, enquanto reagem de forma autónoma aos eventos mundiais reais/físicos influenciando-os e executando os processos que desencadeiam as ações e criam serviços com ou sem intervenção humana direta.

Por exemplo, com a aplicação da IoT é possível realizar a monitorização do desempenho de equipamentos industriais, a partir de informações geradas pelos equipamentos, assim, problemas invisíveis como a degradação da máquina, o desgaste de componentes, etc. podem ser detetados. A *Internet of Services* (IoS) apresenta uma abordagem semelhante, porém utiliza serviços em vez de entidades físicas. “Através da IoS os serviços internos e inter-organizacionais são oferecidos pela internet e podem ser utilizados por todos os participantes da cadeia de valor” (Bahrin, et al., 2016).

A utilização de *Big Data* e de *Cloud-computing* também contribuirá para o ambiente de produção da I4.0. A recolha e a análise abrangente de dados oriundos de diversas fontes e clientes apoiará o processo de tomada de decisão complexa permitindo otimizar as operações de forma mais efetiva e conseqüentemente melhorar o desempenho do sistema. Além disso, com o uso destas tecnologias, os dados podem ser acedidos de qualquer lugar, através da utilização de um *tablet* ou *smartphone* (European Parliament , 2016).

Estas novas estruturas industriais, dotadas de dispositivos “inteligentes”, ligados à rede, onde os produtos e os sistemas de produção obtêm capacidades de comunicação, constituirão as *Smart Factories* do futuro e são a chave para alcançar o grau de flexibilidade necessária para superar os desafios atuais de alta variabilidade, da personalização e da redução dos ciclos de vida dos produtos.

Na visão de Zuehlke (2010), a *Smart Factory* está estreitamente alinhada com a IoT. Nessa perspetiva, a IoT é percebida como uma rede aberta de objetos equipados com capacidades de computação e comunicação capazes de agir de uma forma independente, sem nenhuma intervenção (Gubbi, et al., 2013).

Nas *Smarts Factories* os protótipos físicos tornar-se-ão menos importantes. As simulações vão alavancar dados em tempo real para replicar o mundo físico num modelo virtual, que pode incluir máquinas, produtos ou seres humanos. Isso permitirá aos operadores testar e otimizar as configurações da máquina para o próximo produto em linha no mundo virtual, antes de realizar a sua transição física, reduzindo assim os tempos de configuração da máquina e

umentando a qualidade (Bahrin, et al., 2016). Concebidas em módulos, estas fábricas serão capazes de se ajustar a mudanças inesperadas, substituindo ou expandindo os módulos individuais. Por exemplo, em caso de flutuações sazonais ou alterações nas características do produto.

Ainda segundo Zuehlke (2010) os pré-requisitos para a criação dessas *Smarts Factories* são: um grau de “inteligência” incorporado em todos, mesmo nos pequenos dispositivos, enquanto algumas das funcionalidades importantes serão fornecidas pela tecnologia RFID. Através de um endereço exclusivo para a troca de dados, as *tags* RFID são capazes de interagir e cooperar no ambiente de produção de modo a atingir os objetivos comuns (Atzori, et al., 2010). Os potenciais benefícios desta tecnologia estão descritos mais detalhadamente na seção 3.2.1.

De acordo com o European Parliament (2016), a lógica subjacente a esta transformação industrial é caracterizada por três dimensões:

- Integração vertical: onde a conexão de pessoas, objetos e sistemas nas *Smarts Factories* leva à criação de redes dinâmicas de valor;
- Integração horizontal: refere-se à integração de diferentes agentes através de redes de valor, tais como os parceiros de negócios e os clientes, podendo ocorrer dentro de uma *Smart Factory* ou em diferentes *Smart Factories* (Liu & Xu, 2016);
- Integração digital de ponta a ponta: é sustentada pelas integrações vertical e horizontal, uma vez que a recolha de informações do produto ao longo de todo seu ciclo de vida, agrega valor desde a concepção até à logística de saída.

Como foi explanado anteriormente, um conjunto de tecnologias chave serão responsáveis por acelerar a transição do ambiente de produção atual para o ambiente descentralizado exigido pela I4.0. Todavia, Martinez, et al. (2016) na sua revisão da literatura, ao analisar 531 resumos de publicações relacionadas com o tema constataram que a palavra-chave “*technolog**” constava em apenas 50% dos resumos. Em seguida, com menor frequência apareceram as palavras-chave *IoT*, *CPS* e *Cloud* já referidas anteriormente. Das 35 palavras-chave relevantes encontradas, a palavra-chave “RFID” aparece em menos de 5% dos resumos. *Augmented Reality* (AR) e a tecnologia *3D printing*, que são consideradas os pilares desta revolução (Michael , et al., 2015) nem sequer apareceram nos resultados. Perante esta lacuna da literatura e da importância destas tecnologias para o desenvolvimento da I4.0, estas serão apresentadas em mais detalhes nas próximas seções.

3.2.1. Radio Frequency Identification (RFID)

A RFID é uma tecnologia de identificação automática que funciona com base na emissão de sinais de rádio, capazes de identificar e aceder a informações contidas em *tags* (Ferreira & Aydos, 2016), as quais estão ligadas ou incorporadas em objetos. Através das *tags* RFID pode-se conhecer a identidade, a localização atual, a condição e a história de um objeto, sem nenhuma intervenção humana (Brintrup, et al., 2010). A recolha de dados em tempo real a cada etapa do processo sincroniza o fluxo de produtos e o fluxo de informações, reduzindo/eliminando os erros. Além disso, quando comparado com os tradicionais códigos de barra, a tecnologia RFID traz vantagens nomeadamente aos níveis da capacidade, da dependência e da segurança dos dados. Ao contrário dos códigos de barras, que devem ser lidos individualmente, as *tags* RFID não precisam de estar dentro da linha de visão do leitor, podendo ser lidas simultaneamente e incorporadas nos objetos. Relativamente à segurança, por ser imutável, um código de barras pode ser facilmente falsificado, enquanto que nas *tags* RFID as informações são encriptadas e a informação é transmitida diretamente do produto para a base de dados (Brown, 2007).

Embora esta tecnologia ainda apresente alguns inconvenientes, tais como, os custos mais elevados de implementação e as interferências na transmissão dos sinais de rádio causadas por ambientes húmidos e com a presença de grandes quantidades de metais e ruído. Para Zelbst, et al. (2010), a utilização desta tecnologia pode proporcionar melhorias significativas na produtividade, nos tempos de ciclo, nas datas de entrega e no fluxo de caixa da empresa, além de ajudar a reduzir os custos operacionais e de gestão de inventários, minimizando os níveis de *stocks*. Estes benefícios são confirmados por empresas que apostaram na variedade de aplicações desta tecnologia em ambientes I4.0. Um exemplo, ocorre na *Smart Factory* da Bosch, em Hamburgo, na Alemanha (Michael , et al., 2015). Numa linha de montagem para mais de 200 versões de válvulas hidráulicas, a fábrica flexível utiliza porta-ferramentas “inteligentes” equipados com *tags* RFID, que detectam a variante do produto e comunicam os materiais e os processos necessários à linha de montagem. Cada estação de trabalho lê as *tags* e exibe as informações relevantes para os operadores em *flat screen*. Ao aproveitar o poder da “produção em massa flexível”, a instalação pode montar economicamente uma grande variedade de produtos personalizados até para o lote unitário. A tecnologia de ponta reduz o tempo de processamento e permite uma utilização otimizada dos recursos. Noutro exemplo, a Faurecia, fornecedora de peças de automóvel “Tier One”, abriu recentemente uma nova fábrica de sistemas de controlo de emissões em Columbus, no estado Norte-Americano de Indiana. A fábrica que servirá como referência industrial 4.0 a nível mundial, recolherá e analisará dados diretamente do chão de fábrica, a fim de prever e prevenir falhas de equipamentos, corrigir ineficiências e aumentar a produtividade. O rastreamento automatizado de componentes por meio de *tags* RFID simplificará a logística e possibilitará a gestão em tempo real dos fluxos de *stocks* e da qualidade (Weber, 2016).

3.2.2. *Augmented Reality (AR)*

Os sistemas baseados em AR podem suportar uma variedade de serviços, tais como selecionar peças num armazém ou enviar instruções de reparação por meio de dispositivos móveis (Bahrin, et al., 2016). Assim, as informações de manutenção em campo, que muitas vezes são de difícil interpretação e requerem a experiência por parte dos operadores, podem ser simuladas em *smartphones* ou *tablets*, reduzindo os custos de deslocação, evitando interpretações erradas e conseqüentemente retrabalhos nas ações de manutenção. Além disso, a tecnologia AR pode incorporar novas interfaces homem-máquina para a fabricação de aplicações e ativos de TI, exibindo KPI's (*Key Performance Indicators*) e *feedbacks* em tempo real sobre os processos de fabricação, a fim de melhorar a tomada de decisões (Gorecky, et al., 2014). Desta forma, a AR torna-se também uma tecnologia de habilitação chave para o ambiente da I4.0, à medida que melhora a transferência de informações entre os mundos digital e físico (Romero, et al., 2016) e auxilia na cooperação entre os seres humanos e as máquinas.

Embora atualmente estes sistemas estejam numa fase inicial, no futuro, o uso da tecnologia AR no ambiente industrial será muito mais amplo, uma vez que as empresas já constataram que a sua utilização pode oferecer vantagens nomeadamente na redução da dependência, bem como na melhoria do controle da qualidade. Uma das aplicações da AR, por exemplo, é o treino virtual. A *Siemens* desenvolveu um módulo de treino de operador virtual para o seu software “Comos” que utiliza uma base de dados de um ambiente 3D real, com óculos de realidade aumentada para treinar os operadores a lidar com as emergências. Neste mundo virtual, os operadores aprendem a interagir com máquinas clicando numa ciberrepresentação. Eles também podem alterar parâmetros e recuperar dados operacionais e instruções de manutenção (Michael, et al., 2015).

3.2.3. *Additive Manufacturing*

A *Additive Manufacturing* está a ser apontada como uma das tecnologias de produção mais promissoras a nível global. Segundo a European Commission (2016a) elas estão a implusionar a transição da produção em massa para a personalização em massa em vários setores líderes.

Refere-se a um grupo de tecnologias, dentre as quais destaca-se a *3D printing*, que criam produtos através da adição de materiais camada a camada em vez de processos de maquinagem (Cotteleer, et al., 2013). Desta forma, disponibiliza novas funcionalidades para fornecer soluções na fabricação de pequenos lotes de produtos complexos e personalizados, sem que os custos de produção aumentem exponencialmente. Além disso, permite encurtar o

ciclo de desenvolvimento do produto até ao seu lançamento no mercado e reduzir os desperdícios, resultando em processos mais eficientes (Cotteleer, et al., 2013).

Esta tecnologia, possui uma vasta gama de aplicações que vão desde a produção de protótipos, maquetes, peças de substituição, coroas dentárias, membros artificiais e até mesmo pontes (Chen & Y., 2017). Num ambiente industrial composto por tecnologia *3D printing*, o produto pode ser fabricado a partir do momento em que a ordem de produção é recebida, eliminando a necessidade de *stocks* e melhorando a logística. Para além disso, pode beneficiar regiões remotas ou subdesenvolvidas, reduzindo a sua dependência de trabalhadores qualificados e permitindo aos fabricantes uma maior liberdade na criação de *designs*. A produção local e descentralizada também contribui para redução dos obstáculos à entrada das PME's no ambiente industrial 4.0. Vários casos de sucesso têm demonstrado a viabilidade dessa tecnologia (Chen & Y., 2017), especialmente quando relacionada com a produção de protótipos e componentes individuais. Para os gigantes do sector automóvel, BMW e *Jaguar Land Rover*, por exemplo, a *3D printing* é a força motriz por detrás dos grandes automóveis.

Entretanto, a *3D printing* enfrenta ainda alguns desafios técnicos como: a imprecisão, o custo elevado para a produção em massa e as limitações no tamanho dos componentes que podem ser impressos (Deloitte, 2014). Estes fatores podem colocá-la em desvantagem quando comparada com a fabricação tradicional. Também é preciso ter especial atenção a algumas questões que surgem com esta tecnologia, nomeadamente relativas à propriedade intelectual, responsabilidade do produto, direitos aduaneiros e impostos sobre o valor agregado (European Parliament, 2016). Ultrapassar estes obstáculos representará um ponto de partida para que a tecnologia *3D printing* possa avançar como uma das tecnologias chave na abordagem 4.0.

3.3. Potencial Tecnológico da *Industry 4.0*

Como referido na seção anterior, o tema I4.0 emerge da sobreposição de vários desenvolvimentos tecnológicos envolvendo produtos e processos (Schmidt, et al., 2015). As empresas da Europa, Estados Unidos e Ásia (Michael , et al., 2015) já iniciaram a corrida para adotar elementos desta revolução, a qual enfrenta o desafio de ser altamente automatizada e rentável, além de ser capaz de fornecer produtos diferenciados e personalizados num ambiente de produção em massa.

Com um potencial bastante ambicioso, a I4.0 promete maior eficácia operacional, ganhos de produtividade, crescimento, e melhoria da competitividade, bem como o desenvolvimento de novos modelos de negócio, serviços e produtos (Kagermann, et al., 2013; Kagermann, 2014).

A expectativa é que esta revolução possa gerar ganhos de produtividade em torno de 78 mil milhões de euros em seis sectores até 2025 (Bauer, et al., 2014).

À medida que os sensores, os computadores e as máquinas ligadas em rede podem comunicar facilmente entre si e com os seus utilizadores em tempo real, os processos de produção tornam-se mais visíveis e monitorizáveis, reduzindo as taxas de falhas, o que contribui para a melhoria da qualidade. Uma outra tendência inovadora é que as empresas em vez de venderem produtos acabados, podem vender o seu *know-how* ou outros tipos de serviços. Isso permite que outras empresas ou parceiros usem as suas competências e conhecimento como um serviço para desenvolver o seu próprio produto ou compensar as suas capacidades de produção (Khan & Turowski, 2016b).

Embora considerado um paradigma de elevada complexibilidade, visto numa perspetiva estratégica para o futuro, a I4.0 pode trazer inúmeros benefícios. Dentre estes, Deloitte (2014) destaca os seguintes:

- Soluções específicas para empresas específicas (*pull from the customer*) e compreensão individualizada dos clientes mesmo em caso de fabricação de artigos pontuais, possibilitando volumes de produção muito baixos (tamanho de lote unitário) e ainda obtenção de lucro;
- Aumenta a competitividade e a flexibilidade resultantes de uma estrutura dinâmica de negócios. Ajuste às mudanças na procura ou desagregações na cadeia de valor;
- Tomada de decisão otimizada devido à visibilidade de ponta a ponta em tempo real;
- Aumenta a produtividade dos recursos (fornecendo a maior produção de produtos num dado volume de recursos) e eficiência (usando a menor quantidade possível de recursos para produzir um determinado produto);
- Cria novas oportunidades (serviços inovadores, novas formas de emprego, oportunidades para as PME's e serviços B2B);
- Mantém os trabalhadores produtivos por mais tempo, oferecendo-lhes carreiras diversificadas e flexíveis;
- Proporciona um maior equilíbrio entre a vida pessoal e profissional dos trabalhadores;
- É extremamente vantajosa para as economias de altos salários e capital intensivo, possibilitando reduzir os custos de energia e os custos com mão de obra.

3.4. Desafios

O aumento da digitalização nos sistemas de produção determina mudanças em toda a cadeia de valor, desde a forma como é realizada a aquisição das matérias-primas até o seu uso final e recuperação (Deloitte, 2015). Os conceitos e as visões acima mencionados são perspectivas

muito promissoras de um desenvolvimento tecnológico próximo. No entanto, apesar do esforço conjunto dispendido por governos, organizações e académicos, e dos casos comprovados de sucesso, ainda há um longo e sinuoso caminho a percorrer e questões que devem ser respondidas antes que esta revolução digital se possa tornar uma realidade.

De acordo com o European Parliament (2016), a segurança e a proteção digital; a padronização dos interfaces de comunicação; os processos e a organização do trabalho; a disponibilidade de capacidade cognitiva e a inserção das PME's aparecem como uma das maiores preocupações das empresas quando o assunto é incluir a I4.0 na sua estratégia de negócios. Um estudo realizado por Deloitte (2014), que analisou o posicionamento das empresas suíças em relação à I4.0 revelou que uma grande parte das empresas acredita que a transformação digital promovida pela I4.0 aumentará a sua competitividade. Apesar disso, a maioria delas ainda não se sente segura quando o assunto é implementar projetos nessa área.

Os sistemas produtivos do futuro ainda requerem muita investigação. Os problemas relacionados com a incompatibilidade das interfaces de comunicação e a segurança na transmissão dos dados, ainda são um forte inconveniente para alavancar o desenvolvimento colaborativo entre os diferentes prestadores de serviços. No entanto, diversas entidades já estão a trabalhar para desenvolver soluções tecnológicas capazes de remover esses obstáculos e cooperar para o objetivo comum da I4.0.

3.4.1. Segurança e Proteção Digital

Com o aumento de dispositivos “inteligentes” ligados à rede, os riscos relacionados com a segurança de dados também irão aumentar. No contexto industrial 4.0, onde a comunicação autónoma entre os dispositivos impera, devem ser estabelecidos procedimentos que assegurem um nível de segurança adequado aos riscos inerentes a esta comunicação e à natureza dos dados a serem protegidos. Isto envolve salvaguardar a propriedade intelectual, os dados pessoais e a privacidade, a operabilidade, a proteção ambiental e a saúde e segurança dos trabalhadores (European Parliament, 2016), além de exigir colaboração entre governos, organizações especializadas em TI e as indústrias, que terão de trabalhar como parceiros na procura de soluções adequadas e na promoção das melhores práticas.

3.4.2. Padronização

A padronização é apontada como o desafio mais importante na implementação da I4.0. Para garantir a interoperabilidade e alcançar todo o seu potencial, é fundamental a adoção de uma arquitetura de referência que forneça uma descrição técnica de normas e possibilite a

comunicação eficaz entre todos os utilizadores e processos, integrando a produção, sistemas e partes interessadas de gestão. Por exemplo, na última década, a introdução da IoT nos sistemas produtivos contribuiu para o aumento da quantidade, da heterogeneidade e da velocidade dos dados gerados ao nível de produção (Khan & Turowski, 2016b). Sem uma abordagem padronizada para analisar, processar e armazenar essas informações, os dados gerados em diferentes formatos permaneceriam incompatíveis a nível mundial e a abordagem 4.0 estaria limitada à produção local, restringindo a sua capacidade de realizar economias de escala e ter ganhos de produtividade (European Parliament, 2016).

3.4.3. Organização do Trabalho

O surgimento de novos modelos de negócios, exigirá mudanças no que diz respeito à organização do trabalho. Para isso, o ambiente de produção deverá ser adaptável ao nível dos processos (Khan & Turowski, 2016b) de forma a suportar a flexibilidade necessária para fornecer produtos mais individualizados (personalização em massa) e customizados com custos reduzidos.

3.4.4. Capacidade Cognitiva

Um dos obstáculos enfrentados pelo I4.0 está relacionado com as pessoas. Os novos cenários exibidos pela I4.0 terão implicações significativas na natureza do trabalho, já que transformarão a concepção, a fabricação, a operação dos produtos e serviços nos sistemas de produção (Michael, et al., 2015). Estas transformações são resultados do aparecimento de sistemas tecnológicos altamente sofisticados e que vão exigir cada vez mais trabalhadores com habilidades específicas (Kagermann, et al., 2013). Uma das soluções para amenizar este problema é o aumento da migração. No entanto, a integração de trabalhadores com culturas e competências educacionais diferentes trará desafios adicionais para as indústrias. Isso significa que as empresas que estão comprometidas com o paradigma da I4.0 terão que investir em programas de formação e desenvolvimento que capacitem os operadores para lidar com as novas ferramentas e tecnologias.

3.4.5. PME

As atividades de produção fornecem cerca de 20% de todos os postos de trabalho das indústrias na União Europeia (UE), estes por sua vez, são dominados em grande parte pelas PME's (Wadhwa, 2012).

Nesse contexto, existe uma necessidade identificada de facilitar a transição das PME's para o paradigma da I4.0, de forma a aumentar a sua integração em cadeias de valor digitais (globais), promovendo a adoção de serviços digitais especializados e aumentando a recolha de dados para monitorizar a produção (European Commission, 2016).

A digitalização das PME's tem como objetivo permitir aos parceiros ao longo da cadeia de abastecimento (European Commission, 2016):

- Melhorar produtos e / ou serviços;
- Reduzir custos;
- Gerir as operações de forma mais eficiente graças à monitorização do desempenho da produção;
- Melhorar a concorrência (acesso a dados e informações úteis e melhor resposta às necessidades do mercado).

Para tal, é necessário sensibilizar as PME's para as oportunidades oferecidas pelo paradigma da I4.0 e sobre o inequívoco valor acrescentado que essa cooperação pode oferecer em condições de fronteiras dinâmicas e em ambientes de complexibilidade crescente. Além disso, esta integração possibilita que os parceiros possam desenvolver projetos comuns baseados em plataformas *Open Source*, acelerando o tempo de colocação dos produtos no mercado, a inovação e a minimização de os riscos. A abordagem *Software as a Service* (SaaS), por exemplo, facilita o acesso das PME's a serviços digitais inovadores sem exigir elevados investimentos em infra-estruturas ou licenças dispendiosas (European Commission, 2016).

4. Integração *Lean* e *Industry 4.0*

4.1. Vantagens da Combinação

Os sistemas de produção do século atual têm testemunhado enormes mudanças em relação à sua versão original. De acordo com o relatório sobre o futuro da Europa, as indústrias dependerão cada vez mais da flexibilidade e dos custos reduzidos para se manterem competitivas (Zhang, et al., 2014). Sobreviver neste cenário instável implica a adoção de uma abordagem que seja capaz de alcançar esses atributos simultaneamente.

O governo alemão, assim como governos de outros países e organizações influentes acreditam que a I4.0 terá um papel relevante na formação e na atuação dessas novas indústrias. A implementação deste paradigma de produção possibilitará às empresas melhorarem os seus resultados através de processos mais rápidos e precisos, de eficiência e da redução de taxas de erro, entre outros (Martinez, et al., 2016). Melhorias estas, que também estão incluídas no conjunto de benefícios prometidos pelo *Lean Production*.

No entanto, apesar da abordagem *Lean* ser amplamente discutida e aplicada numa variedade de indústrias em todo o mundo, diversos fatores restringem o seu campo de atuação. Um deles é lidar com os desvios na procura dos mercados, causados pela necessidade de satisfazer as exigências de clientes que estão em constante evolução. Embora a *Lean* suporte uma maior variedade de produtos, qualquer alteração nos processos de produção, reservas de *stocks* e tempos de ciclo exigem ajustes laboriosos dos cartões *Kanban* (Dickmann, 2007a), limitando a produção para ciclos de vida do produto mais curtos e para a produção individual. Para além disso, os métodos de produção *Lean* têm as suas origens na década de 1950 e, portanto, não levam em consideração as possibilidades das tecnologias modernas. Desde os anos 60, Ohno (1988) já afirmava que os processos deveriam ser automatizados e supervisionados pelos funcionários. Princípio este, denominado automação (Ohno, 1988). Nesse cenário, a I4.0 cria um potencial significativo de investigação no que se refere à melhoria contínua. Para Frison (2015), a I4.0 pode tornar obsoleta algumas técnicas *Lean*, mas em contrapartida solicita outras ferramentas para alcançar os seus resultados.

Assim, acredita-se que uma organização que já possua um certo grau de maturidade na implementação da filosofia e das ferramentas *Lean* pode oferecer menos riscos à introdução das soluções oferecidas pela I4.0. Além do seu carácter integrativo, a abordagem LP quando comparada com outros tipos de metodologias é mais padronizada, mais transparente e focada no trabalho essencial (Kolberg & Zuhlke, 2015). Como resultado, os processos tornam-se menos complexos, traduzindo-se em um ambiente ideal para a aplicação das soluções da I4.0.

Para além disso, a utilização integrada de novas tecnologias atuam como um reforço às ferramentas *Lean*, à medida que viabilizam a recolha e análise de dados importantes sobre o chão de fábrica e ao nível de gestão, fornecendo soluções para as principais causas de falhas e ineficiências em gestão de operações, como a falta de precisão das informações e dados sensíveis ao tempo (Chongwatpol & Sharda, 2013).

De acordo com Tamás, et al. (2016) a combinação dessas duas abordagens resultará numa utilização mais eficiente de recursos humanos e de máquinas, o que trará uma infinidade de possibilidades e vantagens para as empresas, tais como:

- Com a IoT será possível realizar a comunicação entre os diferentes dispositivos (equipamentos tecnológicos, equipamentos de manuseamento de materiais, peças, cargas unitárias, etc.). O controlo central será alterado para descentralizado no futuro;
- Os processos de decisão complexos serão substituídos pelas decisões em tempo real com o auxílio da simulação;
- Os sistemas de produção estreitamente planeados serão transformados em sistemas de produção baseados em módulos. Isto será possível devido ao aumento de equipamentos flexíveis (por exemplo, 3D printing);
- As partes passivas serão transformadas em partes “inteligentes” (CPS) que poderão influenciar o seu ambiente através do uso de informação pré-programada;
- Será possível a otimização de sistemas maiores através da conexão em rede dos dados dos dispositivos (*Cloud*). Com isso, será possível a criação e atuação otimizada de toda a *Supply Chain* da empresa;
- A recolha e processamento de elevados volumes de dados (*Big Data*) permitirá a criação de novos modelos de negócios;

Ainda segundo Tamás, et al. (2016), a logística também será influenciada significativamente por essas mudanças. A partir da utilização de dispositivos “inteligentes” (objetos e máquinas equipados com sensores RFID) será possível reduzir mais eficientemente os desperdícios. Estes dispositivos enviarão dados sobre as condições dos produtos (por exemplo, alterações na temperatura, humidade ou defeitos) em tempo real, propiciando melhorias na previsão de falhas, controlo da qualidade e no tempo de execução das tarefas a realizar. Armazéns “inteligentes” também vão contribuir para reduzir os *stocks* e conseqüentemente os custos e os prazos de entrega.

Entretanto, apesar das soluções da I4,0 estarem em geral associadas a elevados investimentos, elas podem ser particularmente lucrativas em áreas onde os métodos *Lean* não são ou não cumprem completamente os requisitos necessários. Na prática, essas novas

oportunidades de melhoria devem resultar em mais-valias para os *stakeholders* a um risco aceitável.

O caminho para a revolução digital promovida pela I4.0 já está aberto. Portanto, no futuro, as empresas que não conseguirem se adaptar enfrentarão dificuldades para sobreviver.

4.2. Soluções *Industry 4.0* para *Lean Production*

Conforme discutido na seção anterior, novas possibilidades de melhoria da eficiência tornam-se disponíveis com o uso conjunto dos dispositivos da I4.0 e da filosofia *Lean*. A integração bem-sucedida destas duas abordagens permitirá não só satisfazer as necessidades de cada cliente de forma rápida e eficiente, mas também com um custo apropriado.

No contexto dos processos de melhoria contínua (*Kaizen*), a integração das novas tecnologias nas empresas *Lean* proporcionará alcançar elevados níveis de qualidade de forma a atingir a excelência nos produtos fabricados, nos sistemas de produção e na organizações em geral.

Nas próximas seções descrevem-se exemplos de como as soluções da I4.0 podem complementar as ferramentas LP e apoiá-las no alcance dos objetivos da melhoria contínua.

4.2.1. *Continuous Flow*

A filosofia *Lean* tem como foco global desenvolver o fluxo no ambiente produtivo. O fluxo de matérias-primas, semi-acabados e produtos acabados precisa ser contínuo e ao ritmo dos pedidos dos clientes. Isto garante que a informação e os materiais adequados são entregues ao sistema de produção na quantidade correta e no momento em que foram requisitados. O fluxo é conseguido através do desenvolvimento de sistemas de produção flexíveis que balanceiam a utilização das pessoas e equipamentos de forma que cada processo agregue valor para o cliente final e resulte em um fluxo simplificado de operações.

Os erros na contagem de *stocks*, a escassez de capacidade e os sistemas centralizados de controlo podem levar a interrupções no fluxo e consequentemente atrasos na tomada de decisões. Para eliminar os erros associados aos *stocks*, a I4.0 emprega tecnologia RFID para monitorizar os *stocks* em tempo real. Com o *status* atualizado, é possível reduzir a manutenção de *stocks* durante longos períodos os quais se acabam por refletir nos custos dos produtos.

De acordo com Sanders, et al. (2016), a integração horizontal possibilitada pela I4.0, vai ligar as empresas em rede (*Cloud*) facilitando a subcontratação. Com a programação e o planejamento integrados, as empresas subcontratadas terão menos dificuldades em gerir a escassez de capacidade. Através da IoT, os CPS podem negociar tempos de ciclo e assim encontrar a melhor capacidade possível de utilização por estação de trabalho num fluxo contínuo de mercadorias (Jasti & Kodali, 2015). A transferência para uma estrutura descentralizada transformará a produção em sistemas autónomos e dinâmicos, capazes de se autoajustarem de acordo com programas de produção atualizados.

Com o mesmo objetivo, Wan, et al. (2014) propuseram um método de distribuição de materiais baseado na IoT num ambiente de produção JIT para uma linha de montagem de modelo misto. Eles construíram um modelo matemático para a distribuição de materiais com base no *layout* da produção e informações sobre os materiais em cada estação de trabalho. Um algoritmo de otimização inteligente foi desenvolvido para resolver este modelo e resultou num plano de distribuição otimizado, eliminando as interrupções, as esperas na linha de produção e os atrasos, o que conduziu a um fluxo dinâmico e contínuo.

4.2.2. Just in Time (JIT)

A filosofia JIT popularizada através do Sistema de Produção *Toyota* exige que os produtos sejam fabricados somente na quantidade exata, no momento exato, de forma a eliminar a necessidade de armazená-los antes de serem usados.

No entanto, para o JIT funcionar plenamente, este depende fortemente da qualidade das informações logísticas. Qualquer interrupção no fluxo de informações pode provocar distorções na procura dos pedidos e amplificar o chamado “efeito chicote”, gerando excesso de *stocks* ou a falta deles.

A IoT está equipada com diferentes dispositivos integrados de comunicação, capazes de fornecer as informações necessárias sobre as mercadorias transportadas. Através do uso de *tags* RFID, pode-se conhecer a identidade, a localização atual, a condição e a história de um objeto sem nenhuma intervenção humana (Brintrup, et al., 2010). A captura de dados em tempo real a cada etapa do processo sincroniza o fluxo de produtos com o fluxo de informações, reduzindo/eliminando os erros. O rastreamento de cada item garante os produtos corretos para os destinos corretos, no momento em que foram solicitados.

No caso de ocorrer algum congestionamento imprevisto ou qualquer outro obstáculo, um alocador “inteligente” de tarefas inicia um processo de negociação simulado, redirecionando as rotas para satisfazer as exigências de restrições de tempo (Fischer, et al., 1996).

Uma outra tecnologia com potencial para apoiar a produção JIT é a *3D printing*. Como referido na seção 3.2.3, através da produção de protótipos e componentes individuais, regiões remotas ou subdesenvolvidas que oferecem dificuldades logísticas podem ser beneficiadas. Com o uso dessa tecnologia, os produtos são fabricados a partir do momento em que recebem a ordem, eliminando a necessidade de grandes *stocks* para garantir os prazos de entrega.

4.2.3. Kanban

Num ambiente de LP, cada uma das estações de trabalho tem que ser capaz de receber um cartão *Kanban*, interpretá-lo e usá-lo para “puxar” a produção. Isso faz com que os recursos sejam requisitados somente no momento em que é dada a ordem, evitando assim o desperdício.

A substituição dos convencionais cartões *Kanban* pela sua versão eletrônica (*eKanban*), aprimora o sistema tradicional, à medida que reduz a probabilidade de erros ao eliminar problemas de falhas humanas no preenchimento dos cartões, as tarefas burocráticas e a excessiva circulação de papel.

Baudin & Rao (2005) descreveram como a utilização de *tags* RFID pode melhorar um sistema *eKanban*. De acordo com eles, um leitor de RFID deteta automaticamente a chegada de caixas que estão dentro da sua faixa de proximidade. Através de uma rede de sensores o *eKanban* envia um *Kanban* virtual e aciona o reabastecimento. Ao usar o *eKanban*, o fluxo de informações é atualizado em tempo real, melhorando o controle da produção. Além disso, ajustes no *Kanban* devido a mudanças nos tamanhos dos lotes, processos ou tempos de ciclo tornam-se menos laboriosos (Dickmann, 2007b).

Uma outra vantagem em relação ao antigo sistema está relacionada com a visualização. O *eKanban* exibe os fluxos de todos os setores produtivos em painéis ou monitores que podem ser visualizados em qualquer parte da empresa, dentro ou fora das unidades de produção.

4.2.4. Poka-Yoke

O *Poka-Yoke* é uma expressão japonesa que significa à prova de erro ou algo que ajuda a evitar os erros. No sistema LP é extremamente importante obter a qualidade na origem, isso significa que um produto com defeito não deve ser enviado para o processo seguinte, visto que correções nos produtos representam desperdício de tempo e de dinheiro.

Com a sua capacidade de integração, o CPS conectado através da IoT pode oferecer uma base flexível para suportar processos propensos a falhas. A utilização de *tags* RFID contribui para a monitorização das condições das máquinas e produtos em tempo real, evitando que os produtos com defeitos prossigam na linha de produção. Assim, a produção torna-se mais segura, as operações de correção tornam-se mais rápidas e os ajustes em casos de alterações das exigências podem ser realizados em qualquer momento. Além disso, permitem identificar componentes opticamente idênticos, num sistema produtivo com alta variedade de produtos (Jasti & Kodali, 2015).

O uso de ferramentas de AR também tem potencial para apoiar os métodos de controlo *Poka-Yoke*. Por exemplo, para realizar o controlo da qualidade, operários equipados com óculos de AR podem visualizar uma peça que possui uma *tag* RFID e sobrepô-la a um modelo virtual da mesma, de forma a identificar as não conformidades.

4.2.5. Pull System

Num sistema de produção *Lean*, cada sequência de trabalho só é desencadeada quando é autorizada pela estação subsequente. Isso significa produzir o que o cliente precisa no momento certo e nas quantidades certas. Desta forma, o fluxo é “puxado” e não “empurrado” ao longo da cadeia de valor.

Um sistema *Push* (empurrar), onde a produção dos produtos e as encomendas de matérias-primas têm origem em previsões de procura dos clientes, conduz à produção de *stocks* extras, que por sua vez, elevam os custos dos produtos devido à fabricação, à manutenção, etc. O rastreamento inadequado dos materiais fornecidos às linhas de produção e as alterações nos horários também afetam gravemente o fluxo da produção.

O *Kanban* é um dos melhores métodos para implementar a produção “puxada”. No contexto da I4.0, um sistema *eKanban* pode reconhecer o nível de carregamento de um compartimento automaticamente e solicitar o reabastecimento. Através de sensores RFID, as informações sobre o *status*, o número e a localização dos lotes de materiais podem ser monitorizados possibilitando o controlo dos *stocks* em tempo real. Com o *ekanban*, as mudanças também podem ser continuamente monitorizadas atualizando constantemente os parâmetros do *Kanban* e evitando falhas no controlo da produção (Sanders, et al., 2016) .

4.2.6. Single-Minute Exchange of Die (SMED)

Um dos principais desafios enfrentados pelas indústrias do futuro é como adaptar as máquinas e as ferramentas existentes para atender às crescentes procuras do mercado e ao mesmo tempo oferecer produtos finais com maior qualidade e precisão. A questão a ser resolvida é como tornar os sistemas de produção já instalados mais flexíveis e personalizáveis, sem aumentar a complexidade e os custos.

Segundo Jasti & Kodali (2015), a I4.0 pode apoiar a LP através de uma produção flexível e modular. As *Smart Factories* com estações de trabalho modulares baseadas em interfaces físicas e de comunicação padronizadas, podem ser flexivelmente reconfiguradas para novas linhas de produção via *Plug'n'Produce*.

A tecnologia *Plug'n'Produce* foi criada tendo como base o conceito *Plug-and-Play* utilizado nos computadores. Trata-se de ajustar os parâmetros de máquinas e equipamentos através da introdução de um *software* ou *hardware*. Quando aplicada à fabricação tem potencial para melhorar a qualidade dos processos e dos produtos.

Com os equipamentos ligados e a possibilidade de transferências e acesso a dados, o sistema *Plug'n'Produce* pode permitir transferências do SMED de uma única estação de trabalho para toda a linha de produção (Jasti & Kodali, 2015).

A tecnologia AR também poderá apoiar a ferramenta SMED na busca de melhorias nos processos. Para trocar rapidamente da produção de um produto para outro, um sistema de rastreamento em combinação com um HMD (Head Mounted Display) pode informar o operador da troca e dar-lhe instruções sobre como deve proceder, incluindo a localização das ferramentas, o número necessário ou mesmo como devem ser montadas. Nesse caso, um holograma poderia ser útil, fornecendo uma projeção passo-a-passo das tarefas a serem realizadas.

4.2.7. Supplier Development

As discrepâncias existentes nas operações ou práticas de manutenção de dados entre fabricantes e fornecedores dificultam a comunicação entre os parceiros de negócios podendo transformar-se numa fonte significativa de desperdícios. Segundo Sanders, et al. (2016) para reduzir essas diferenças, os fornecedores devem ser envolvidos em todos os processos e serem regularmente informados sobre o estado e a condição dos produtos e serviços prestados por eles.

A I4.0 está habilitada para fornecer as ferramentas necessárias para superar questões do burocráticas e canais de comunicação inadequados de forma a criar um ecossistema de colaboração entre todos os parceiros da *Supply Chain*. A experiência combinada das empresas expande os horizontes do negócio, junto com a mitigação benéfica dos riscos em caso de catástrofes (Sanders, et al., 2016). Através da I4.0, os tradicionais mecanismos de comunicação são renovados com a utilização da *Cloud* e de dispositivos de computação móvel (*tablets* e *smartphones*). As redes tecnológicas estabelecidas ajudam na partilha de ativos intangíveis, tais como I&D, bem como dos recursos tangíveis, tais como as máquinas, os equipamentos e os peritos humanos.

Numa abordagem globalizada, essa metodologia de *benchmarking* facilita a integração horizontal e vertical proposta pela I4.0. Com uma configuração descentralizada e flexível é consideravelmente vantajosa, especialmente no domínio das PME's. No contexto da I4.0 o desenvolvimento de uma cooperação sinérgica, além dos limites de cada indústria, beneficia o desenvolvimento dos fornecedores, colocando-os em pé de igualdade com os fabricantes. Essas alianças ajudam a minimizar os *stocks* e, ao mesmo tempo, aumentar a personalização e a capacidade de resposta da *Supply Chain* tanto para fornecedores como para os clientes (Shah & Ward, 2003).

4.2.8. Value Stream Mapping (VSM)

O VSM foi criado com base no diagrama do fluxo de material e de informações da Toyota. O objetivo principal deste método é a redução dos resíduos através da melhoria dos processos logísticos. Como mencionado anteriormente (ver seção 2.5), o mapeamento do estado atual ajuda a expor os entraves ao fluxo *Lean* diagnosticando as condições do sistema. Cada entrave é considerado uma fonte de desperdício e também uma oportunidade de melhoria (Nash & Poling, 2008). O mapeamento do estado futuro, por sua vez, fornece soluções para transformar o sistema atual num sistema com um fluxo *Lean*, para além de atuar como um modelo para desenvolver e implementar um plano de ações.

No entanto, o método básico, que funciona através da aquisição manual de dados de uma linha de produção, não pode ser utilizado com a eficiência adequada em casos de sistemas logísticos complexos (Tamás, 2015), por exemplo em empresas que fabricam uma grande variedade de produtos. Para solucionar este problema, Tamás, et al. (2016) sugerem uma aplicação conjunta da ferramenta VSM com as técnicas de modelagem de simulação.

A incorporação de *tags* RFID nos produtos, em contraste com o método tradicional, tornará possível recolher automaticamente informações individualizadas por produto e por linha de produção. Esta forma de recolha de dados, além de requerer menos trabalho, fornece dados

mais precisos (Jasti & Kodali, 2015) que podem ser usados para análise tanto durante, quanto após a produção.

Com a estrutura de dados predefinida é possível criar um modelo experimental de simulação com base em funções objetivas e na otimização de algoritmos. O potencial significativo incide na elaboração de um sistema de exames (tentativa e erro), que seja capaz de criar a melhor versão do sistema.

Chen, et al. (2012) também desenvolveram um sistema para criar um VSM na produção. Através da utilização de *tags* RFID e de tecnologia de transmissão de dados via internet (*Cloud*), elaboraram um sistema online de monitorização que envia informações em tempo real sobre o fluxo de materiais no chão de fábrica (por exemplo, tempos de entrega e detransporte). Em posse desses dados o sistema consegue gerar um VSM para uma diversidade de produtos.

A tabela 3 apresenta um quadro resumo das soluções apresentadas.

Tabela 3. Quadro Resumo Integração *Industry 4.0* e *Lean*

	RFID	CPS	IoT	Cloud	Big Data	Simulation	AR	3D printing	Smart Factory	Horizontal and Vertical Integration	Plug'n Produce
Continuous Flow	X	X	X	X	X				X	X	
JIT	X		X	X	X			X			
Kanban	X			X	X						
Poka-Yoke	X	X	X	X	X		X				
Pull System	X			X	X						
SMED	X	X	X	X	X		X		X		X
Supplier Development				X	X				X	X	
VSM	X			X	X	X					

5. Principais Conclusões

Os sistemas de produção *Lean* desafiaram com sucesso as práticas convencionais de produção em massa, reduzindo as atividades sem valor agregado e fornecendo produtos de qualidade com enfoque na satisfação dos clientes. Ao nível global, as indústrias empenharam-se para se tornarem organizações “*Lean*” e aproveitarem os benefícios associados a esta filosofia. Contudo, nem todas as organizações tiveram sucesso nessa jornada. As constantes mudanças nos mercados globais e a elevada competitividade conduziram à necessidade de fornecer produtos personalizados para satisfazer clientes cada vez mais exigentes. Embora o *Lean* permita alcançar bons resultados na produção de lotes reduzidos, qualquer ajuste nos processos, tempos de ciclo ou *stocks*, aumenta a complexidade dos processos, limitando a produção ao fabrico de produtos com ciclos de vida mais curtos e lotes unitários. Assim, as organizações têm procurado novas metodologias de gestão e de produção de forma a alcançar a flexibilidade necessária para suportar as condições impostas pelos cenários atuais.

Neste contexto, e perante a lacuna identificada por Martinez, et al. (2016), pretendeu-se com esta dissertação explorar o atual estado do conhecimento com o objetivo de dar uma compreensão abrangente das expectativas e os desafios impostos pela integração das novas tecnologias nos processos produtivos. Para tal, o *Lean* e a *Industry 4.0* foram investigados a fim de verificar o atual envolvimento dessas duas abordagens da produção e responder à seguinte pergunta de investigação: As tecnologias da *Industry 4.0* atuam como facilitadoras fornecendo as ferramentas necessárias para alavancar os sistemas de produção *Lean*?

Para responder à questão de investigação foi desenvolvido um plano de propostas composto por um conjunto de tecnologias contempladas pela I4.0. Os exemplos selecionados mostraram que a integração das soluções da I4.0 à abordagem da LP é um tópico atualizado e promissor que deve ser investigado. A *Industry 4.0* com os seus sistemas avançados de informação e comunicação integrados e ligados em rede dota as organizações de uma capacidade significativa para lograr os objetivos do *Lean*. O CPS, a IoT e o *Big Data* facilitam a comunicação entre os “dispositivos inteligentes” oferecendo amplas possibilidades de otimização e colaboração para as indústrias. Além destes benefícios, a combinação destas duas abordagens da produção traz benefícios financeiros resultantes da redução/eliminação de desperdícios redundantes que compensam os investimentos necessários para embarcar nesta 4ª Revolução Industrial.

Portanto, conclui-se que a I4.0 representa uma oportunidade significativa para apoiar as ferramentas de LP no alcance dos objetivos da melhoria contínua. Estas duas abordagens de produção podem ser perfeitamente combinadas de forma a apoiarem-se no desenvolvimento

de uma estrutura, que permita aumentar a flexibilidade e superar as deficiências das práticas convencionais.

No entanto, apesar dos muitos benefícios identificados nesta dissertação, os problemas relacionados com a incompatibilidade das interfaces de comunicação, a segurança na transmissão dos dados e a capacidade cognitiva dos trabalhadores ainda são um forte inconveniente para alavancar o desenvolvimento colaborativo entre os diferentes prestadores de serviços. Outra restrição é que embora as soluções I4.0 para a LP descritas já existam, as aplicações ainda são isoladas e não consideram o potencial global da integração de ambas as abordagens.

À vista disso, este trabalho procurou contribuir para a discussão em curso entre a comunidade científica e os profissionais do ramo em torno dos benefícios da integração das tecnologias da I4.0 nos ambientes produtivos *Lean*, e assim fornecer um importante *insight* sobre como as organizações poderão empenhar-se nesta nova Revolução Industrial, considerando os investimentos necessários, os requisitos exigidos e os seus potenciais benefícios.

As limitações desta dissertação resultam do seu caráter exploratório e do método de recolha de dados. Apesar da investigação exploratória ser de suma importância em novas áreas de investigação, os estudos empíricos são fundamentais para ajudar a melhorar e verificar as teorias existentes, dando maior credibilidade a um determinado tema. Outra limitação foi a utilização apenas de dados secundários. O uso de dados primários recolhidos diretamente através de estudos de caso e de questionários com gestores de empresas poderia ter contribuído para aumentar a fiabilidade dos resultados.

Embora este trabalho tenha sido capaz de provar a viabilidade dos objetivos propostos, para ajudar as organizações a alcançar a plenitude dos resultados e reduzir o fosso existente entre estas duas abordagens, propõe-se para trabalhos futuros o desenvolvimento de um quadro mais abrangente que contenha recomendações de soluções I4.0 para a LP, com exemplos de estudos de caso e descrições detalhadas que permitam uma melhor avaliação da inclusão de *Lean* nesta nova Revolução Industrial.

Referências Bibliográficas

- Anderl, R., 2015. *Industrie 4.0 - Advanced engineering of smart products and smart production. 19th International Seminar on High Technology, Vol. 19*, Piracicaba, Brazil.
- Atzori, L., Iera, A. & Morabito, G., 2010. The internet of things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), p. 2787-2805.
- Bahrin, M., Othman, F., Azli, N. & Talib, M., 2016. Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. *Jurnal Teknologi, Vol. 78*, pp. 137-143.
- Barretto, A., 2012. Toyota Production System: Lean manufacturing implementation and application to an automotive parts industry. *Tekhne e Logos*.
- Baudin, M. & Rao, A., 2005. RFID applications in manufacturing. *SME Automation & Assembly Summit*, Saint Louis.
- Bauernhansl, T., Ten Hompel, M. & Vogel-Heuse, B., 2014. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik- Anwendung, Technologien und Migration*. Germany: Springer Vieweg.
- Bauer, W., Schlund, S., Marrenbach, D. & Ganschar, O., 2014. *Industrie 4.0-volkswirtschaftliches potenzial*, Berlin: BITKOM/Fraunhofer IAO.
- Bhamu, J. & Sangwan, K., 2014. Lean manufacturing: Literature review and research issues. *International Journal of Operations & Production Management*, 34(7), pp. 876-940.
- Bhasin, S. & Burcher, P., 2006. Lean viewed as a philosophy. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 17(1), pp. 56-72.
- Bhattacharjee, A., 2012. *Social science research: principles, methods, and practices*. Textbooks Collection ed. Flórida: 3.
- Bitkom; Vdma; ZVI, 2016. *Implementation strategy industrie 4.0, Report on the results of the Industrie 4.0 Platform*, Frankfurt.
- Brintrup, A., Ranasinghe, D. & McFarlane, D., 2010. RFID opportunity analysis for leaner manufacturing. *International Journal Of Production Research*, 48(9), pp. 2745-2764.
- Brown, D., 2007. *RFID Implementation*. New York, NY, USA: McGraw Hill Professional.
- Chen, K., Chen, J. & Cox, R., 2012. Real time facility performance monitoring system using RFID technology. *Assembly Automation*, 32(2), pp. 185-196.
- Chen, T. & Y., C., 2017. Feasibility evaluation and optimization of a smart manufacturing system based on 3D printing: A review. *International Journal of Intelligent Systems, Vol. 32*, pp. 394-413.
- Cheng, C. et al., 2015. *Semantic degrees for industrie 4.0 engineering : Deciding on the degree of semantic formalization to select appropriate technologies*. Bergamo, Italy.

Chongwatpol, J. & Sharda, R., 2013. Achieving lean objectives through RFID: A simulation-based assessment. *A Journal of Decision Sciences Institute*, 44(2), pp. 239-266.

Correa, C., 2007. Por dentro da maior montadora do mundo. *Exame*, pp. 22-30.

Cotteleer, M., Holdowsky, J. & Mahto, M., 2013. *The 3D opportunity primer The basics of additive manufacturing*, Deloitte University Press.

Dean Jr., J. & Snell, S., 1996. The strategic use of integrated manufacturing: An empirical examination. *Strategic Manufacturing Journal* , Vol. 17, pp. 459-480.

Delloite, 2014. *Industry 4.0 Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies*. [Online] Available at: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/manufacturing/ch-en-manufacturing-industry-4-0-24102014.pdf>. [Acesso em 14 02 2017].

Delloite, 2015. *Industry 4.0 An Introduction*, Netherlands.

Dickmann, E., 2007a. *Elektronische kanban-systeme (eKanban) in Dickmann, P. (ed) Schlanker Materialfluss: mit Lean Production, Kanban und Innovationen*. Berlin: Springer.

Dickmann, P., 2007b. Hybride steuerungskonzepte in *Schlanker Materialfluss: Mit Lean Production, Kanban und Innovationen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, pp. 143-148.

Drew, J., McCallum, B. & Roggenhofer, S., 2004. *Journey to lean: Making operational change stick*. UK: Palgrave Macmillan.

Edwards, D., 1996. Practical guidelines for lean manufacturing equipment. *Production and Inventory Management Journal* , 37(2), pp. 51-55.

European Commission, 2016. *SMEs to the industry 4.0*. [Online] Available at: <http://s3platform.jrc.ec.europa.eu/sme-integration-to-industry> [Acesso em 12 04 2017].

European Commission, 2016a. *High performance production through 3D-printing*. [Online] Available at: <http://s3platform.jrc.ec.europa.eu/high-performance-production-through-3d-printing>. [Acesso em 04 03 2017].

European Parliament, 2016. *Industry4.0*. [Online] Available at: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/570007/IPOL_STU\(2016\)570007_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/570007/IPOL_STU(2016)570007_EN.pdf). [Acesso em 05 03 2017].

Ferreira, J. C. E. & Aydos, T. F., 2016. *RFID-based system for lean manufacturing in the context of Internet of Things*. Fort Worth, Texas.

Fischer, K., Müller, J. & Pischel, M., 1996. Cooperative transportation scheduling: An application domain for DAI. *Applied Artificial Intelligence*, 10(1), pp. 1-34.

Frison, A., 2015. *Impact of industry 4.0 on lean methods: And the Business of german and chinese manufacturer in China*. Kindle Edition.

Gil, A., 2002. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 4 ed. São Paulo: Atlas S.A.

- Gorecky, D. et al., 2013. Mastering mass customization - A concept for advanced, human-centered assembly. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 2(11), pp. 62-67.
- Gorecky, D., Schmitt, M., Loskyll, M. & Zuhlke, D., 2014. *Human-machine-interaction in the industry 4.0 era*. Porto Alegre RS, Brazil.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. & Palaniswami, M., 2013. Internet of things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), pp. 1645-1660.
- Gupta, S. & Jain, S. K., 2013. A literature review of lean manufacturing. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 8(4), pp. 241-249.
- Hall, R., 1983. *Zero Inventories*. Dow Jones-Irwin, Homewood, IL.
- Hermann, M., Pentek, T. & Otto, B., 2016. *Design principles for industrie 4.0 scenarios: A literature review*. Hawaii, United States, Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Island of KauaiKoloa.
- Hines, P. & Taylor, D., 2000. *Going Lean*. 1 ed. Cardiff, UK: Lean Enterprise Research Centre.
- Hines, P., Holweg, M. & Rich, N., 2004. Learning to evolve: A review of contemporary lean thinking. *International Journal of Operations & Production Management*, pp. 994-1011.
- Holweg, M., 2007. The genealogy of lean production. *Journal of Operations Management*, Vol. 25, pp. 420-437.
- Hozdić, E., 2015. Smart factory for industry 4.0: A review. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 7(1).
- Jasti, N. V. K. & Kodali, R., 2015. Lean production: Literature review and trends. *International Journal of Production Research*, pp. 867-885.
- Kagermann, H., 2014. Chancen von Industrie 4.0 nutzen. in: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, pp. 603-614.
- Kagermann, H., Wahlster, W. & Helbig, J., 2013. *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the industrie 4.0 working group*, Frankfurt, Germany.
- Khan, A. & Turowski, K., 2016a. *A Perspective on industry4.0: from challenges to opportunities in production systems*. Rome, Italy, International Conference on Internet of Things and Big Data.
- Khan, A. & Turowski, K., 2016b. *A survey of current challenges in manufacturing industry and preparation for industry 4.0*. Sochi, Russia.
- Kolberg, D. & Zuhlke, D., 2015. Lean Automation enabled by industry 4.0 technologies. *Ifac - PapersOnline*, 48(3), pp. 1870-1875.
- Lasi, H. et al., 2014. Business & Information Systems Engineering. *The International Journal of WIRTSCHAFTSINFORMATIK*, Vol. 6, pp. 239-242.

Lean Institute Brasil, *Muda, Mura, Muri - Tipos Atividades que Geram Desperdícios*. [Online] Available at: <http://www.lean.org.br/conceitos/78/muda,-mura,-muri---tipos-atividades-que-geram-desperdicios.aspx>. [Acesso em 18 03 2017].

Lewis, M., 2000. Lean production and sustainable competitive advantage. *International Journal of Operations & Production Management*, pp. 959-978.

Liker , J. K. & Morgan, J. M., 2006. The Toyota Way in Services: The Case of Lean. *Exchange*.

Liker, J. K., 2004. *The Toyota way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. McGraw-Hill.

Liu, Y. & Xu, X., 2016. *Industry 4.0 and cloud manufacturing: A comparative analysis*. Blacksburg, Virginia, USA.

Locher, D., 2008. *Value stream mapping for lean development : A how to guide for streamlining time to market*. CRC Press-Taylor & Francis.

Lorenzon, I. & Martins, R., 2006. *Discussão sobre a medição de desempenho na Lean construction*. [Online] Available at: http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/505.pdf [Acesso em 05 04 2017].

Martinez , F., Jirsak , P. & Lorenc, M., 2016. *Industry 4.0. The end the lean management?*. Prague.

Michael , R. et al., 2015. *Michael, R. Markus, L. and et al. 2015. Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries*. [Online] Available at: https://www.bcgperspectives.com/content/articles/engineered_products_project_business_industry_40_future_productivity_growth_manufacturing_industries/#chapter1. [Acesso em 10 03 2017].

Mohanty, R., Yadav, O. & Jain, R., 2007. Implementation of lean manufacturing principles in auto industry. *Vilakshan-XIMB Journal of Management*, 1(1), pp. 1-32.

Monden, Y., 1998. *Toyota Production System: An integrated approach to just-in-time*. Engineering & Management Press.

Nash, M. & Poling, S., 2008. *Mapping the total value stream - A comprehensive guide for production and transactional processes*. Productivity Press-Taylor e Francis Groupe.

Negrão, L., Filho, M. & Marodin, G., 2017. Lean practices and their effect on performance: A literature review. *Production Planning & Control*, 28(1).

Ohno, T., 1988. *The Toyota Production System: Beyond large-scale production*. Portland, Oregon: Productivity Press.

Pavnaskar, S., Gershenson, J. & Jambekar, A., 2003. Classification scheme for lean manufacturing tools. *International Journal of Production Research*, 41(13), pp. 3075-3090.

Pettersen, J., 2009. Defining lean production: Some conceptual and practical issues. *The TQM Journal*, 21(2), pp. 127-142.

- Pinto, J., 2009. Pensamento Lean - A filosofia das organizações vencedoras. *Lidel*, Issue 2°.
- Radnor, Z. J. & Boaden, R., 2004. Developing an understanding of corporate anorexia. *International Journal of Operations & Production Management*, 24(4), pp. 424-440.
- Romero, D. et al., 2016. *Towards an operator 4.0 typology: A human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies*. Tianjin, China.
- Sanders, A., Elangeswaran, C. & Wulfsberg, J., 2016. Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(3), pp. 811-833.
- Scherrer-Rathje, M., Boyle, T. & Deflorin, P., 2009. Lean, take two! Reflections from the second attempt at lean implementation. *Business Horizons*, 52(1), p. 79-88.
- Schmidt, R. et al., 2015. *Industry 4.0 - potentials for creating smart products: Empirical research results*. Leipzig, Germany.
- Shah, R. & Ward, P., 2003. Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance. *Journal of Operations Management*, 21(2), pp. 129-149.
- Shah, R. & Ward, P., 2007. Defining and developing measures of lean production. *Journal of Operations Management*, Vol. 25, pp. 785-805.
- Shingo, S., 1985. *A Revolution in manufacturing: The SMED system*. Cambridge, MA: Productivity Press.
- Smith, R. & Hawkins, B., 2004. *Lean maintenance: reduce costs, improve quality, and increase market share*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Stone, k. B., 2012. Four decades of lean: a systematic literature review. *International Journal of Lean Six Sigma*, pp. 112-132.
- Sugimori, Y., Kusunoki, K., Cho, F. & Uchikawa, 1977. Toyota production system and Kanban system materialization of just-in-time and respect-for-human system. *International Journal of Production Research*, pp. 553-564.
- Sundmaeker, H., Guillemin, P., Friess, P. & Woelffl, S., 2010. *Vision and challenges for realising the Internet of Things*, Cluster Eur. Res. Proj. Internet Things - CERP IoT.
- Takeuchi, H., Osono, E. & Shimizu, N., 2008. The contradictions that drive Toyota's success. *Harvard Business Review*, Vol. 86, pp. 96-104.
- Tamás, P., 2015. Application of value stream mapping at flexible manufacturing systems. *Key Engineering Materials*, Vol. 686, pp. 168-173.
- Tamás, P., Illés, B. & Dobos, P., 2016. *Waste reduction possibilities for manufacturing systems in the industry 4.0*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 161.
- Temple, N., 2016. The smart factory and the converging roles of IT, production and engineering. in: *Smart IoT*. London, UK: Excel.
- Tiwari, S., Dubey, R. & Tripathi, N., 2011. The Journey of Lean. *Indian Journal of Commerce and Management Studies*, pp. 200-2008.

- Wan, Y., Zhu, H., Mu, Y. & Yu, H., 2014. Research on IoT-based material delivery system of the mixed-model assembly workshop. *4th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation (IEMI2013)*, pp. 581-593.
- Wadhwa, R., 2012. Flexibility in manufacturing automation: A living lab case study of Norwegian metalcasting SMEs. *Journal of Manufacturing Systems*, 31(4), pp. 444-454.
- Weber, A., 2016. *Industry 4.0: Myths vs. Reality*. Assembly Magazine.
- White, R., Pearson, J. & Wilson, J., 1999. JIT manufacturing: A Survey of Implementations in Small and Large U.S. Manufacturers. *Management Science*, 45(1), pp. 1-15.
- Womack, J. & Jones, D., 1994. From lean production to the lean enterprise. *Harvard Business Review* 72, p. 93-103.
- Womack, J. & Jones, D., 1996. *Lean thinking - banish waste and create wealth in your corporation*. New York, NY: Simon & Schuster.
- Womack, J. & Jones, D., 2004. *Lean thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. New York, NY: 2^a ed. Simon and Schuster.
- Womack, J., Jones, D. & Roos, D., 1990. *The Machine That Changed the World*. New York, NY: Rawson Associates.
- Womack, J., Jones, D. & Ross, D., 2007. *The machine that changed the world - How Lean production revolutionized the global car wars*. Sydney: Simon & Schuster.
- Wu, Y., 2003. Lean manufacturing: a perspective of lean suppliers. *International Journal of Operations and Production Management*, 23(11), pp. 1349-1376.
- Wyrwicka, M. & Mrugalska, B., 2015. Barriers to eliminating waste in production system. *Proceedings of the 6th international conference on engineering, project, and production management*, pp. 354-363.
- Zelbst, P. J., Green Jr, K. W. & Sower, V. E., 2010. Impact of RFID technology utilization on operational performance. *Management Research Review*, 33(10), pp. 994-1004.
- Zhang, D., Chen, M., Guizani, M. & Xiong, H., 2014. Mobility prediction in telecom cloud using mobile calls. *IEEE Wirel. Commun*, 21(1), pp. 26-32.
- Zuehlke, D., 2010. SmartFactory—towards a factory-of-things. *Annual Reviews in Control*, 34(1), pp. 129-138.