

As contribuições da Indústria 4.0 na Gestão de Operações

How Industry 4.0 contributes with Operation Management

Resumo: A incorporação de novas tecnologias integradoras na manufatura foi denominada de Indústria 4.0. Estas tecnologias direcionam a indústria para um novo paradigma de produção, em que existem menores interferências humanas e o sistema é inteligente e interconectado. Essa conexão entre os componentes do sistema gera a interação das tecnologias com várias áreas de conhecimento, tais como digitais e físicas. A Indústria 4.0 possui foco na produção inteligente de produtos, métodos e processos. Tecnologias como RFID, sensores, processamento na nuvem, fazem parte dos muitos componentes que podem ser encontrados em um sistema orientado pela Indústria 4.0. Sua aplicação resulta em oportunidades de transformação de como é realizada a Gestão das Operações (GO) nas empresas. Este artigo tem como objetivo verificar a contribuição das aplicações da Indústria 4.0 na GO. A partir de um levantamento de 38 casos de sucesso resultantes de implementações tecnológicas ligadas à manufatura 4.0 serão identificados seus benefícios para a GO. Os resultados indicam que as contribuições da Indústria 4.0 estão mais concentradas nas áreas de Gestão de Tecnologia e Manufatura Just-in-Time. Além disso, o nível de maturidade dos casos analisados ainda é incipiente indicando um potencial de aumento de produtividade com a aplicação destas tecnologias no setor produtivo.

Palavras-chave: indústria 4.0, níveis de maturidade, gerenciamento de operações.

Abstract: The incorporation of new technologies on manufacturing was called Industry 4.0. These technologies direct the industry to a new production paradigm where there are fewer human interferences and the system is intelligent and interconnected. This connection between the system components generates the interaction of technologies with various areas of knowledge, such as digital and physical. Industry 4.0 focuses on: the intelligent production of products, methods and processes. Technologies such as RFID, sensors, processing in the cloud, are part of the many components that can be found in a system oriented by Industry 4.0. The application of these technologies has the opportunity to transform how the Operations Management is carried out in companies. This article aims to verify the contribution of the application cases of Industry 4.0 in Operations Management. From a survey of 38 success cases resulting from technological implementations related to manufacturing 4.0, it will be identified the benefits of these applications for Operations Management. The results indicate that Industry 4.0's contributions are more concentrated in the areas like Technology Management and Just-in-Time Manufacturing. In addition, the maturity level of the analyzed cases is still incipient indicating a potential of increased productivity after the application of these technologies in the productive sector.

Keywords: industry 4.0, maturity level, operations management.

1. Introdução

A indústria 4.0 reflete um novo paradigma no que diz respeito às grandes revoluções industriais. No século 18 ocorreu a primeira revolução industrial, em que começaram a ser introduzidas as máquinas nos processos industriais com o aprimoramento das máquinas a vapor e a criação do tear mecânico (Lu, 2017). No início do século 20 já estava em andamento uma nova revolução, que caracterizou-se pela divisão do trabalho, introdução da produção em massa com ajuda da energia elétrica, a exploração de novos materiais, como aço e produtos sintéticos e o descobrimento de novas formas de combustível (Shrouf, 2014; Deloitte, 2014; Brettel et al., 2014). Nos anos 70, a terceira revolução industrial passa a ser incorporada à indústria, caracterizada pela aplicação de controladores lógicos programáveis (*Programmable Logic Controllers* - PLC) para automação da manufatura (Brettel et al., 2014) além da utilização de tecnologias da informação para o gerenciamento da produção (Stock e Seliger, 2016).

Atualmente os processos produtivos se preparam para o que pode ser denominada uma quarta revolução industrial, viabilizada pela utilização da internet para realizar a comunicação entre pessoas e também entre máquinas, por meio de amplas redes de comunicação (Brettel et al., 2014) em um sistema denominado cyber-físico (*Cyber-Physical Systems* - CPS). Este novo paradigma está embasado em fábricas digitalizadas, capazes de combinar tecnologias da internet e máquinas e produtos inteligentes (*smarts*) (Lasi e Kemper, 2014). O termo Indústria 4.0 (*Industrie 4.0*) foi primeiramente utilizado em um relatório do grupo de trabalho para o desenvolvimento da manufatura para o governo da Alemanha (Kagermann et al., 2013). Apesar deste termo ser bastante difundido, também são utilizados outros para apresentar as características deste tipo de sistema de manufatura, tais como Manufatura Avançada (Lee et al., 2015), *Smart Industry* ou *Smart Factories* (Shrouf et al., 2014; Sonntag et al., 2017; Davis et al., 2012, p. 145; Wiesmüller, 2014, p. 1), *Industrial Internet of Things* (IIoT) (Lee et al., 2015; Dou e Nan, 2015), *Industrial Internet* (Evans e Annunziata, 2012; Bruner, 2013) entre outros.

O desenvolvimento da Indústria 4.0 busca atingir um alto nível de eficiência operacional, produtividade e automação dos sistemas produtivos (Thames e Schaefer, 2016). Apesar do objetivo comum, a literatura não apresenta um consenso para a sua definição (Shafiq et al., 2015; Lu, 2017). Weyer et al. (2015) propõem o conceito de Indústria 4.0 como dispositivos, máquinas, módulos de produção e produtos organizados em um sistema cyber-físico (CPS) com capacidade de trocar informações de forma autônoma e realizar autocontrole de suas operações (Weyer et al., 2015). Apesar disso, este conceito pode ainda ser ampliado

para uma visão da cadeia de valor, como a um novo nível de organização e gerenciamento desta cadeia durante o ciclo de vida dos produtos (Kagermann et al., 2013) ou ainda como um conjunto de tecnologias e conceitos aplicados na sua organização (Hermann et al., 2016).

Assim como a diversidade dos conceitos de Indústria 4.0, os benefícios de sua aplicação também podem ser variados. A integração de objetos físicos, interações humanas, máquinas inteligentes, processos e linhas de produção resulta no desenvolvimento de uma nova cadeia de valor, inteligente, conectada e ágil (Schumacher et al., 2016). Esta nova cadeia viabiliza o desenvolvimento de novos modelos de negócios com diferentes organizações do trabalho (Kagermann et al., 2013; Kluth et al., 2014). Estas possibilidades de arranjo das diferentes alternativas das tecnologias da Indústria 4.0 podem resultar em diversos benefícios, tais como: melhorias na redução do tempo de processamento dos produtos (Qin et al., 2016), melhorias de qualidade (Lee et al., 2014), eficiência dos processos (Lasi e Kamper, 2014), redução do custo de processos (Qin et al., 2016; Stock e Seliger, 2016), flexibilidade de processos (Brettel et al., 2014), melhor atendimento dos requisitos dos clientes (Stock e Seliger, 2016), personalização dos produtos (Brettel et al., 2014; Shafiq et al., 2015) entre outros.

Esta diversidade de conceitos e potenciais benefícios da aplicação da Indústria 4.0 nas empresas resulta em uma dificuldade de estabelecer um procedimento de sua aplicação na prática das empresas (Drath e Horch, 2014; Ford, 2015). Ainda se verifica uma falta de compreensão das implicações da aplicação da Indústria 4.0 no gerenciamento da manufatura (Almada-Lobo, 2016). Além disso, o gerenciamento de operações de manufatura é um tópico genérico e composto de diversas áreas de atuação, sendo que a contribuição da Indústria 4.0 pode acontecer em diversas dessas áreas (Qin et al., 2016). A partir disso, o problema de pesquisa que direciona este artigo é identificar quais as contribuições das aplicações práticas da Indústria 4.0 para o gerenciamento de operações das empresas.

Este estudo tem por objetivo identificar a contribuição das aplicações da Indústria 4.0 nas empresas no gerenciamento das suas operações. São diversas as possibilidades de aplicações e a literatura é bastante genérica para identificar com precisão suas contribuições. Para tanto, foi realizado um levantamento de casos de sucesso de aplicação da Indústria 4.0, seguido de uma análise de quais tecnologias são empregadas; do nível de aplicação da Indústria 4.0 e da contribuição das aplicações para o gerenciamento de operações (GO). Os resultados obtidos permitem identificar as características dos casos de aplicação nas diferentes áreas de

GO das empresas. Este resultado estabelece um panorama dessa aplicação prática e visa compreender a forma de contribuição de suas tecnologias para o gerenciamento de operações. Os resultados ainda permitem mitigar a falta de procedimentos para a implementação da Indústria 4.0 nas empresas, tanto ressaltada na literatura (Drath e Horch, 2014; Ford, 2015; Qin et al., 2016).

Este artigo está organizado em cinco seções. Além da introdução, é apresentada uma revisão de literatura sobre características da aplicação da Indústria 4.0. A terceira seção apresenta o procedimento utilizado para coleta dos dados e classificação dos casos analisados. Por fim, a quarta seção apresenta os resultados encontrados a partir da coleta dos dados de aplicação da Indústria 4.0 analisados e, a quinta seção, as considerações finais.

2.0 Revisão de Literatura

Para atingir o objetivo proposto foi realizada uma revisão sobre quais são tecnologias da Indústria 4.0 mais mencionadas na literatura, assim como as classificações de modelos de maturidade propostos para categorizar o nível tecnológico das aplicações. Por fim, foram revisados os conceitos e as subdivisões de atuação utilizadas para a área de Gestão de Operações nas empresas.

2.1 Tecnologias Indústria 4.0

A Indústria 4.0 utiliza dispositivos e tecnologias que tornam possível o desenvolvimento de diversas oportunidades traduzidas em novos produtos ou serviços (Tamás et al., 2016). Essas aplicações são capazes de oferecer vantagens e proporcionam uma abordagem vasta tanto no nível técnico quanto no nível organizacional (Albers et al., 2016). Estas tecnologias podem contribuir de diversas formas a melhoria do desempenho do processo de manufatura (Lee et al., 2014). A aplicação das tecnologias da Indústria 4.0 permitem a transformação do gerenciamento das operações de manufatura, resultando em sua descentralização (Shafiq et al., 2015), uma maior integração vertical (Almada-Lobo, 2016) e horizontal (Henning e Johannes, 2013, Brettel et al., 2014, Hermann et al., 2016) da empresa, além do monitoramento remoto dos processos (Almada-Lobo, 2016).

Para implementar esta transformação estão disponíveis uma diversidade de tecnologias, muitas destas com objetivos semelhantes. A literatura não apresenta uma forma única para denominar as tecnologias da Indústria 4.0. Muitas das classificações de tecnologias utilizadas

na literatura são inclusive incompatíveis entre si, classificando as mesmas tecnologias em categorias diferentes. Como forma de reduzir esta diversidade de classificação este trabalho utiliza as funcionalidades das tecnologias como forma de categorizá-las, resultando em sete diferentes classes de tecnologias. A primeira classe compreende as tecnologias utilizadas para o processamento de informações, denominada de (i) análise e processamento de dados, que incorpora tecnologias como algoritmos avançados para otimização dos processos, *machine learning*, mineração de dados, *big data* e autenticação e detecção de fraudes. A segunda classe de tecnologias está direcionada para aumentar a percepção e uso das informações, denominada de (ii) realidade aumentada, compreendendo a inserção de objetos virtuais no ambiente físico, mostrada ao usuário em tempo real com o apoio de algum dispositivo tecnológico como *wearables*. A terceira classe compreende tecnologias para o processamento de dados remotamente, denominada de (iii) computação em nuvem (*cloud computing*). A quarta categoria está direcionada a portabilidade, denominada de (iv) dispositivos móveis, compreendendo a utilização de terminais móveis para acesso as informações, tais como smartphones, tablets, terminais entre outros. A quinta categoria de tecnologias é denominada de (v) IoT, está destinada por realizar a comunicação e apresentação das informações. Compreende a utilização de sensores inteligentes, *middleware*, tecnologias de detecção de localização, aplicativos IoT, interface de aplicativos (*apps*), RFID entre outros. O quinto tipo de tecnologias é denominada de (vi) manufatura aditiva, tais como impressoras 3D, que utilizam polímeros, metais e outros materiais. Por fim, a sétima categoria de tecnologias, denominada de (vii) sistemas cyber-físicos, compreende a robotização, automação e a utilização avançada de interface homem-máquina e máquina-máquina. A partir desta definição foi possível identificar a frequência de citação destas tecnologias como integrantes da Indústria 4.0 apresentadas na literatura (Tabela 1). Os resultados confirmam que não existe um consenso entre as tecnologias que compõe a Indústria 4.0, sendo esta diversidade de tecnologias resultado da complexidade do tema e do constante desenvolvimento tecnológico.

2.2 Modelos de Maturidade da Indústria 4.0

Com o intuito de medir o nível de desenvolvimento de uma indústria ou de algum de seus processos, geralmente utiliza-se como instrumento um modelo de maturidade (Schumacher, 2016). O objetivo de um modelo de maturidade é descrever as etapas de melhoria de um processo desde um nível incipiente para um nível avançado, incorporando os componentes de cada nível e as recomendações para sua utilização (Paulk et al., 1993). Estes

componentes são frequentemente compostos por práticas, processos, ferramentas e tecnologias utilizadas para aumentar a eficiência da organização (Kwak e Ibbs, 2002). Dessa forma, os níveis de maturidade auxiliam na avaliação e compreensão das competências-chave da organização, sendo um importante mecanismo para a gestão dos processos e melhoria contínua dos mesmos dentro de uma organização (Kosieradzka, 2017).

Tabela 1 - Citação de tecnologias voltadas à Indústria 4.0.

Tecnologias	PwC (2016)	Lee e Lee (2015)	Zuehlke (2010)	Tamás et al. (2016)	Bagheri et al. (2015)	Qin et al. (2016)	Hozdić (2015)	CNI (2016)	Almada-Lobo (2016)
Análise e processamento de dados	X	X	X	X	X			X	X
Realidade aumentada	X								
Computação em nuvem	X	X						X	X
Dispositivos móveis	X				X				X
IoT	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Manufatura aditiva	X							X	X
Sistemas cyber-físicos	X			X	X	X	X	X	X

Na literatura, ainda são poucas as propostas de modelos de maturidade de implementação da Indústria 4.0 nas empresas (Schumacher et al., 2016; PwC, 2016; Rockwell Automation, 2014; Lanza et al., 2015; Porter e Heppelmann, 2015). Entre estas propostas, a desenvolvida por Schumacher et al., (2016) apresenta uma análise mais sistêmica da aplicação da Indústria 4.0 nas empresas, considerando 62 itens que mensuram por meio de uma escala Likert de 5 pontos o nível de implementação dos itens categorizados em nove diferentes dimensões. A proposta desenvolvida pela PwC (2016) mensura as capacidades necessárias para a plena implementação da Indústria 4.0 na empresa a partir da avaliação de seis diferentes dimensões, resultando em quatro diferentes níveis de maturidade (*digital novice*, *vertical integrator*, *horizontal integrator* e *digital champion*). Já a proposta da Rockwell Automation (2014) apresenta cinco níveis de maturidade da implementação da Indústria 4.0 (avaliação; rede e controles seguros e atualizados; capital de dados de trabalho definido e organizado; análises; colaboração), com foco na adoção de tecnologias avaliadas em quatro diferentes dimensões. A proposta de Lanza et al. (2016) envolve três níveis de maturidade que são definidos a partir da análise da adoção de tecnologias e sistemas cyber-físicos nas operações da indústria, bem como o uso de estratégias de produção voltadas a esses fatores. Por fim, a proposta de Porter e Heppelmann (2015) avalia somente o nível de adoção da tecnologia nas soluções entregues ao cliente. Nesta proposta, à medida que as tecnologias são incorporadas aos produtos/serviços são

atingidos níveis superiores de maturidade, correspondendo aos níveis de monitoramento, controle, otimização e autonomia. Cada uma das dimensões consideradas para a identificação dos níveis de maturidade de implementação da Indústria 4.0 nos modelos analisados (Schumacher et al., 2016; PwC, 2016; Rockwell Automation, 2014; Lanza et al., 2015; Porter e Heppelmann, 2015) é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2- Dimensões propostas em modelos de maturidade em Indústria 4.0.

Áreas de avaliação	Schumacher et al. (2016)	Lanza et al. (2016)	PwC (2016)	Rockwell Automation (2014)	Porter e Heppelmann (2015)
Estratégia	X	X	X	X	
Liderança	X				
Consumidores	X		X		
Produtos	X		X		X
Operações	X	X	X	X	
Cultura	X		X		
Pessoas	X			X	
Governança	X				
Segurança			X	X	
Tecnologia	X	X	X	X	X

Verifica-se que a dimensão tecnologia é a mais frequente nos modelos de maturidade analisados. Esta dimensão está direcionada a mensuração do nível de adoção das tecnologias referentes à Indústria 4.0 nos modelos analisados (Schumacher et al., 2016; PwC, 2016; Rockwell Automation, 2014; Lanza et al., 2015; Porter e Heppelmann, 2015). Apesar disso, os diversos modelos de maturidade incluem outras dimensões, muito em razão de considerar o aspecto sistêmico que a sistema da Indústria 4.0 apresenta nas organizações.

2.3 Áreas da Gestão de Operações (GO)

Antes de 1980, os problemas de Gestão de Operações (GO) eram tradicionalmente abordados por meio de pesquisas baseadas em modelos, utilizando metodologias de otimização ou simulação (Sullivan, 1982). A partir de 1980, a disciplina passou por mudanças na sua agenda de pesquisa. Desde então tem-se constatado uma maior implantação de projetos de pesquisa empírica, particularmente pesquisa de opinião, a fim de entender melhor questões como estratégia de fabricação, fabricação *just-in-time*, gestão da qualidade, etc (Rungtusanatham et al., 2003). Como forma de identificar a associação da aplicação das tecnologias da Indústria 4.0 nas áreas GO foram consideradas as áreas propostas por Rungtusanatham et al. (2003). Esta proposta foi selecionada por ser frequentemente citada na literatura e por ter sido publicada no *Journal of Operations Management* (JOM), periódico

qualificado na área de Gestão de Operações (JCR 4,00), com artigos de alto impacto na comunidade científica (Choi e Wacker, 2011). Para a definição das áreas de GO, o estudo desenvolvido por Rungtusanatham et al. (2003) compreende a pesquisa de 285 artigos publicados nos principais periódicos de GO além do JOM: *Decision Sciences* (DS), *Management Science* (MS), *International Journal of Operations & Production Management* (IJOPM), *International Journal of Production Research* (IJPR) e *Production and Operations Management* (POM). A proposta de Rungtusanatham et al. (2003) identifica cinco áreas principais da GO em: (i) Manufatura *Just-in-Time*, (ii) Gestão de Tecnologia, (iii) Estratégia de Operações, (iv) Gestão da Qualidade e (v) Gestão da Cadeia de Suprimentos.

A área de Manufatura *Just-in-Time* (JIT) está direcionada ao gerenciamento do processo de fabricação da empresa, pelo qual a organização busca a melhoria contínua de seus produtos e processos e eliminação de erros (Ptak, 1997; Fullerton, 2001). De acordo com Rungtusanatham et al. (2003), a manufatura *Just-in-Time* implica em melhoria de desempenho, para isso está associada com mudanças no design organizacional, por meio de simplificação (Fullerton, 2001); mudanças no nível do estoque, o que é caracterizado pela encomenda de lotes menores de materiais e consumo quase que imediatamente, o que possibilita a eliminação de desperdício de espaço e a redução dos níveis de estoque (Swanson e Lankford, 1998; Ptak, 1997). Outro requisito do *just-in-time* para garantir produtos de qualidade é manutenção preventiva e limpeza do equipamento (Swanson e Lankford, 1998).

A área de Gestão de Tecnologia é abordada de forma ampla por diferentes autores (Erensal, 2006; Pavitt, 1990; Zehner, 2010; Liao, 2005). Para fim desse artigo serão considerados as características propostas por Rungtusanatham et al. (2003) para esta área, dentre os quais incluem-se sistemas de fabricação flexíveis (Flexible Manufacturing Systems - FMS); manufatura com a utilização de tecnologia avançada, robotização e adoção de manufatura celular.

A área de Estratégia de Operações está relacionada com padrões de escolhas ou decisões associadas com todo o sistema de transformação (Jagoda, 2015). Essa área da GO desdobra a estratégia de negócios às necessidades do nível empresarial até às necessidades de produção, definindo assim o processo de gestão da fabricação (Malhotra et al., 1994). Essa área também considera as estratégias de serviço, de manufatura e de taxonomia (Rungtusanatham et al., 2003).

A área de Gestão da Qualidade busca aumento da qualidade e produtividade juntamente com a melhoria da satisfação dos clientes e funcionários (Terziovski, 2006). Para isso faz-se necessário uso de funções de controle e monitoramento da qualidade no processo produtivo, (Zeng et al., 2013; Kaynak, 2002), por meio de métodos de gestão; implantação de norma ISO 9000 e gestão da qualidade total (Rungtusanatham et al., 2003).

A área de Gestão da Cadeia de Suprimentos considera o produto desde o processamento inicial das matérias-primas até a entrega ao cliente (Linton et al., 2007). Essa área coordena as atividades em toda a cadeia produtiva, por meio de relacionamentos colaborativos entre seus membros, visando criar valor para os clientes e aumentar a lucratividade de cada elo (Hitt, 2016). Essa área compreende os fluxos de produtos, serviços, finanças e informações, sendo fundamental para a definição das estratégias de abastecimento, alianças entre fornecedores, critérios para seleção de fornecedores e parcerias logísticas (Rungtusanatham et al., 2003).

3. Método

3.1 Fonte de dados

A busca de casos de sucesso da implementação da Indústria 4.0 foi desenvolvida de forma a identificar aplicações nas mais variadas áreas da indústria. Inicialmente foram identificados casos de apresentações realizadas em congressos da área, como forma de garantir a distribuição dos casos nos mais diversos campos de atuação. Foram avaliados sete congressos considerados relevantes para a área (Liao et al., 2017). Seguindo esta recomendação foram analisados os casos, referentes aos anos de 2014, 2015 e 2016, apresentados nos seguintes congressos: *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, *CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP – CMS)*, *Internet of Things World Forum*, *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* e *IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM)*. Ao final deste procedimento foi possível identificar somente dois casos com a identificação da empresa e informações suficientes para posterior análise. Também foram coletados seis casos a partir da informação obtida nas apresentações das empresas nestes congressos. Os dados destes casos foram aprofundados a partir das informações coletadas diretamente no *website* das empresas.

Como forma de complementar o levantamento realizado nos congressos também foram considerados casos compilados e apresentados na forma de relatórios nacionais. Foram utilizados dados de casos reportados em levantamento pelo governo da Alemanha (Plataform

Industrie 4.0, 2017) e casos reportados pelo governo do Japão, compilados pela iniciativa *Robot Revolution Initiative* (RRI, 2017). Ao final do levantamento foram identificados 38 casos (Apêndice A). Este procedimento de coleta resultou em casos de diversas áreas de atuação e com diferentes resultados, não comprometendo o procedimento de amostragem realizado. O procedimento de busca foi realizado entre 20 a 30 de abril de 2017. A coleta de dados foi complementada utilizando fontes secundárias, como o *website* da empresa e publicações relacionadas ao caso analisado.

3.2 Análise dos dados

Para cada caso de aplicação da Indústria 4.0 identificado foram realizados três levantamentos: (i) a sua contribuição para a(s) área(s) da Gestão de Operações, (ii) o nível de maturidade da implementação da Indústria 4.0 identificado no caso analisado e (iii) as tecnologias da Indústria 4.0 que foram utilizadas no caso,.

As tecnologias de implementação da Indústria 4.0 apresentadas neste artigo foram definidas a partir da revisão de literatura apresentada na Tabela 1. A classificação do nível de maturidade foi realizada a partir da proposta desenvolvida por Porter e Heppelmann (2015). Apesar das demais apresentadas no referencial teórico deste artigo (Schumacher et al., 2016; PwC, 2016; Rockwell Automation, 2014; Lanza et al., 2015) apresentarem uma avaliação mais abrangente e completa da implementação da Indústria 4.0, as informações relatadas nos casos analisados não possibilitam a identificação do nível de maturidade da aplicação reportada. Entre as propostas, a desenvolvida por Porter e Heppelmann (2014) está direcionada ao nível de maturidade da tecnologia implementada na solução (produto/serviço). Esta foi utilizada em razão das fontes de evidência apresentarem indícios suficientes para a identificação do nível de maturidade da Indústria 4.0. Sendo assim, cada um dos casos de aplicação analisados é classificado de acordo com quatro níveis de maturidade associadas a Indústria 4.0, definidas como: (i) monitoramento, (ii) controle, (iii) otimização e (iv) autonomia. O nível (i) monitoramento incorpora casos em que são aplicadas tecnologias capazes de monitorar e reportar informações do ambiente em tempo real, criando novos dados e informações. Casos classificadas no nível (ii) controle apresentam aplicações que podem controlar por meio de software locado internamente ou na nuvem o funcionamento de dispositivos. O nível (iii) otimização diz respeito às empresas que possuem algoritmos ou análises de dados capazes de otimizar a operação dos produtos, sua utilização e manutenção. Por fim, os casos classificados

no nível (iv) autonomia são aqueles em que seus produtos podem aprender, adaptar-se ao ambiente e as suas preferências, e operar sozinhos (Porter e Heppelmann, 2015).

Para a classificação das contribuições dos casos de implementação da Indústria 4.0 analisados para as áreas do gerenciamento de operações foi utilizada a definição de áreas e o escopo de cada área apresentado por Rungtusanatham et al. (2003). Esta proposta considera cinco áreas no gerenciamento de operações nas organizações: (i) Manufatura *Just-in-Time*, (ii) Gestão de Tecnologia, (iii) Estratégia de Operações, (iv) Gestão da Qualidade e (v) Gestão da Cadeia de Suprimentos. Cada um dos casos foi classificado em uma ou mais áreas do gerenciamento de operações, dependendo de sua contribuição e aplicação na empresa.

A classificação de cada um dos casos foi realizada a partir de um consenso atingido pelos autores. As frequências verificadas são analisadas de acordo com o teste qui-quadrado de independência e em tabelas de contingência. Este teste é utilizado para verificar a hipótese das frequências na tabela de contingência são independentes (Everitt, 1992). São consideradas associações significativas as que apresentarem valor de resíduo ajustado superior a $|1,96|$. Os resultados obtidos são apresentados na seção seguinte.

4. Resultados

As frequências reportadas em cada uma das categorias analisadas não correspondem ao total de casos de aplicação da Indústria 4.0 analisados. Esta característica é consequência de que muitos casos incorporam mais de uma área da Gestão de Operações e utilizam diversas tecnologias associadas em cada caso. Desta forma, ressalta-se que a amplitude da implementação da Indústria 4.0 nas organizações vai além de uma aplicação pontual de determinado tipo de tecnologia, estendendo-se para uma abordagem holística e integrada de tecnologias que atendem a todas as necessidades de um sistema produtivo digital.

4.1 Contribuição da Indústria 4.0 para o gerenciamento de operações

A análise da distribuição dos casos de aplicações da Indústria 4.0 nas áreas de Gestão de Operações indica uma maior concentração de casos na área de Gestão da Tecnologia, seguida pelas áreas de Manufatura *Just-in-Time* e Gestão da Cadeia de Suprimentos (Tabela 3). Esta diferença na distribuição é confirmada pelo teste qui-quadrado, que indica uma dependência da frequência dos casos com as áreas da GO ($\chi^2=38,36;4$; p-valor<0,01). Este resultado reforça a amplitude do conceito da Indústria 4.0, que vai além das áreas tradicionais de manufatura e

tecnologia, confirmando seus conceitos mais abrangentes que se referem a agregação de valor em toda a cadeia de valor (Kagermann et al., 2013).

Tabela 3- Frequência de aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 nos casos avaliados.

Áreas da Gestão de Operações	Frequência	Porcentagem
Gestão de Tecnologia	37	42,05%
Manufatura Just-in-Time	25	28,41%
Gestão da Cadeia de Suprimentos	10	11,36%
Estratégia de Operações	9	10,23%
Gestão da Qualidade	7	7,95%

Todos os casos analisados apresentam aplicação na área de Gestão da Tecnologia. Esta característica acontece em razão das aplicações de Indústria 4.0 analisadas estarem sempre direcionadas para a promoção da flexibilidade dos sistemas de manufatura (*Flexible Manufacturing Systems*). Este é o caso da empresa de guindastes alemã Wolffkran que equipou seus guindastes com o roteador industrial que pode ser controlado remotamente oferecendo maior flexibilidade para a produção. Além disso, a empresa incorpora a área de Manufatura *Just-in-Time* por meio da implementação da manutenção preditiva no sistema. Outro caso apresentado classificado tanto na área de Gestão de Tecnologia quanto na Manufatura *Just-in-Time* é o da Thyssenkrupp, que aplica sistemas de manufatura avançada (*Advanced Manufacturing Technology*) e implementa sistemas de abastecimento *just in time*, respectivamente. Neste caso, identifica-se uma fusão entre o mundo físico e as redes de dados, criando um “sistema cibernético” durante a produção de peças para elevadores. Com o uso dessa tecnologia, a empresa menciona ganhos sustentáveis no gerenciamento da produção, da manutenção, dos processos logísticos, redução de não conformidades nos processos, além de economia de energia.

Nas poucas aplicações da área de Gestão da Qualidade, identifica-se principalmente o uso de sensores inteligentes e tecnologias direcionadas para a redução de erros nos processos de montagem ou desenvolvimento de produtos. Entre os casos analisados, pode-se mencionar o da empresa Volkswagen, que utiliza uma tecnologia de Realidade Aumentada (*Augmented Reality-AR*) por meio da utilização de óculos com câmera integrada no processo de *picking*, resultando em redução de erros, melhora nas condições ergonômicas da atividade e aumento da produtividade. Apesar de poucos casos evidenciarem aplicações direcionadas à área de Gestão da Qualidade, é esperado que as aplicações nas demais áreas contribuam indiretamente na qualidade dos produtos e serviços ofertados pelas empresas.

4.2 Nível de maturidade dos casos da Indústria 4.0 e sua contribuição para o gerenciamento de operações

No âmbito de nível de maturidade da aplicação da Indústria 4.0 nos casos analisados foi verificado que o nível de maturidade monitoramento é o predominante na amostra (Tabela 4). Este resultado é corroborado pela associação significativa ($\chi^2=166,56;3$; p-valor<0,01) da frequência dos casos com os níveis de maturidade das aplicações. A concentração de casos neste nível indica que as aplicações estão direcionadas a monitorar e reportar informações do ambiente em tempo real, estado incipiente em relação ao nível de maturidade de implementação da Indústria 4.0 (Porter e Heppelmann, 2015).

Tabela 4. Teste qui-quadrado para a associação entre nível de maturidade das aplicações de IoT e as áreas da Gestão de Operações

Nível de Maturidade aplicações Indústria 4.0	Gestão de Operações					Total
	Gestão da Tecnologia	Manufatura JIT	Estratégia de Operações	Gestão da Cadeia de Suprimentos	Gestão da Qualidade	
Monitoramento	28 ^(0,5)	18 ^(-0,5)	8 ^(1,1)	7 ^(-0,2)	4 ^(-1,0)	65
Controle	6 ^(-0,6)	6 ^(0,6)	1 ^(-0,6)	2 ^(0,1)	2 ^(0,7)	17
Otimização	2 ^(-0,1)	2 ^(0,5)	0 ^(-0,8)	0 ^(-0,8)	1 ^(1,0)	5
Autonomia	1 ^(0,2)	0 ^(-0,9)	0 ^(-0,5)	1 ^(1,8)	0 ^(-0,4)	2
Total	37	26	9	10	7	89

Frequência ^(resíduo ajustado)

* significant at 5% / ** significant at 1%

Ao analisarmos a associação entre as áreas da GO com os níveis de maturidade não foi verificada nenhuma associação significativa ($\chi^2=7,52;12$; p-valor=0,821). Este resultado é confirmado pela ausência de resíduos ajustados superiores a $|1,96|$ em nenhuma das combinações possíveis. Também indica que não foi verificado na amostra analisada uma maior ou menor concentração de casos com um determinado nível de maturidade em uma específica área da GO. Por mais que o desenvolvimento da Indústria 4.0 tenha sido promovida com foco nas áreas de GO de Manufatura Just-in-Time (pelo gerenciamento da produção) e de Gestão de Tecnologia (pela promoção de FMS e robótica), não foi identificado na amostra um maior desenvolvimento das aplicações nestas áreas.

Verificou-se uma baixa frequência dos níveis de maturidade controle e otimização, e as poucas ocorrências estão direcionadas para casos com aplicações nas áreas de Gestão de Tecnologia e Manufatura *Just-in-Time*. Um caso do nível de maturidade otimização aplicado em ambas áreas da GO citadas, além da área de Gestão da Qualidade, refere-se à empresa HBM. Ela oferece uma solução flexível e simplificada que permite o monitoramento e controle de toda

a cadeia de medição na produção, além de executar algoritmos e cálculos críticos de qualidade que permitem identificar e corrigir problemas durante a produção.

Para o nível de maturidade autonomia foi identificado apenas o caso da empresa Stanley Black & Decker, cuja aplicação está direcionada para as áreas de Gestão de Tecnologia e Gestão da Cadeia de Suprimentos. A empresa usa tecnologias IoT para manter o estoque de materiais e componentes baixo, através de informações detalhadas e maior visibilidade de status e localização dos produtos. Além disso, os clientes também podem obter informações sobre o status de suas encomendas.

4.3 Tecnologias da Indústria 4.0 e sua contribuição para o gerenciamento de operações

Os resultados apresentam um predomínio do uso de tecnologias IoT, seguida de sistemas cyber-físicos e dispositivos móveis nos casos analisados (Tabela 6). Esta maior frequência da utilização de umas tecnologias em detrimento de outras é confirmada pelo teste de independência da estatística qui-quadrado ($\chi^2=162,27;6$; p-valor<0,001). Apesar do termo Indústria 4.0 frequentemente ser utilizado referente a implementação de sistemas cyber-físicos (Monostori, 2014; Lee et al., 2015), as tecnologias IoT apresentam uma maior utilização na amostra de casos analisados. Esta maior frequência pode ser explicada em razão deste tipo de tecnologia contribuir para comunicação entre os sistemas, auxiliando também no funcionamento dos sistemas cyber físicos, além de diversas outros tipos de aplicação. Entre os casos analisados, não foi possível a identificação da utilização de manufatura aditiva. Esta característica pode ser decorrente de que este tipo de tecnologia é constantemente associado a Indústria 4.0, apresentando um desenvolvimento paralelo e independente, sendo inclusive mencionada como uma nova revolução industrial (Berman, 2012).

A análise da associação entre a utilização das tecnologias da Indústria 4.0 com as áreas da GO, permitiu verificar na amostra uma falta de associação entre as duas dimensões. Este resultado indica que nenhuma das tecnologias apresenta uma frequência menor ou maior que a esperada em alguma das áreas da GO. Novamente não foi esperado que a amostra analisada não apresentasse uma associação significativa entre a utilização da tecnologia de sistemas cyber-físicos e a área de Manufatura JIT. Como citado, este tipo de sistema é frequentemente mencionado como correspondente da Indústria 4.0 (Monostori, 2014; Lee et al., 2015), mesmo assim não apresenta uma frequência significativa superior nesta área da GO. Novamente, este

resultado reforça a diversidade de possibilidades de aplicação das tecnologias que incorporam a Indústria 4.0 nos negócios das empresas.

Tabela 5. Teste qui-quadrado para a associação entre as tecnologias da Indústria 4.0 e as áreas da Gestão de Operações

Tecnologias IoT	Gestão de Operações				Total	
	Gestão da Tecnologia	Manufatura JIT	Estratégia de Operações	Gestão da Cadeia de Suprimentos		
IoT	30 ^(0,1)	22 ^(0,4)	8 ^(-0,3)	7 ^(-0,8)	6 ^(0,5)	73
Sist. cyber físicos	10 ^(-0,4)	10 ^(1,0)	3 ^(-0,1)	2 ^(-0,8)	2 ^(0,0)	27
Dispositivos móveis	8 ^(-0,2)	5 ^(-0,5)	4 ^(1,1)	3 ^(0,4)	1 ^(-0,5)	21
Computação em nuvem	7 ^(0,3)	4 ^(-0,4)	2 ^(0,1)	3 ^(0,9)	0 ^(-1,2)	16
Análise e proc. dados	4 ^(0,0)	2 ^(-0,6)	1 ^(-0,2)	2 ^(0,8)	1 ^(0,4)	10
Realidade aumentada	3 ^(0,5)	1 ^(-0,7)	0 ^(-0,9)	1 ^(0,4)	1 ^(0,9)	6
Manufatura aditiva	0 ^(0,0)	0 ^(0,0)	0 ^(0,0)	0 ^(0,0)	0 ^(0,0)	0
Total	62	44	18	18	11	153

Frequência ^(resíduo ajustado)

* significant at 5%/ ** significant at 1%

Entre as áreas de GO, a área de Gestão da Qualidade apresentou baixo uso de tecnologias, pois os casos não ofereceram evidências suficientes para essa classificação. As demais tecnologias (computação em nuvem, análise e processamento de dados e realidade aumentada) estão distribuídas entre as áreas da GO proporcionalmente, exceto a manufatura aditiva que não foi verificada em nenhum dos casos.

Quanto ao uso de tecnologias IoT aplicadas nas áreas de Gestão de Tecnologia e Gestão da Qualidade tem-se a Audi, empresa automobilística alemã. São utilizados sensores inteligentes para monitorar a precisão de seleção e montagem das peças. A tecnologia acompanha as etapas de montagem e oferece *feedback* aos trabalhadores. Outro exemplo é a empresa de TI, Fujitsu, cuja solução está orientada para as áreas de Gestão de Tecnologia e Estratégia de Operações. Além de implementar em algumas plantas a prova de conceito (PoC) utilizando IoT, a empresa também faz uso de computação na nuvem, *cloud service* e *big data*. Como resultado da utilização desses dados, reduziu-se o tempo gasto para engenharia e houve uma detecção precoce de anormalidades, melhorando a qualidade de seus produtos e serviços.

Os sistemas cyber-físicos são prevalentes, principalmente, quando relacionada às áreas de Gestão de Tecnologia e Manufatura *Just-in-Time*. É o caso da empresa química CHT, que usa um sistema que permite interface homem máquina em rede, e assim é possível monitorar em tempo real a produção e registrar todos os parâmetros. Com essa aplicação, a CHT

conseguiu reduzir os custos de fabricação e aumentar a segurança da planta em todo o escopo do projeto.

Os resultados da análise apresentam uma concentração de tecnologias na área da Gestão da Tecnologia, seguida pela área de Manufatura *Just-in-Time*. A área de Gestão da Qualidade apresentou baixo uso de tecnologias, uma vez que os casos analisados não oferecem evidências suficientes para esse diagnóstico. Possivelmente o uso das tecnologias em estudo resulta em melhor qualidade de produtos e serviços, redução de erros e aumento da eficiência dos mesmos.

5. Considerações Finais

Este artigo tem por objetivo identificar a contribuição das aplicações da Indústria 4.0 nas empresas no gerenciamento das suas operações. Foram analisados 38 casos de sucesso, reportados em congressos da área e relatórios governamentais e de empresas, de implementação da Indústria 4.0 e suas contribuições nas diversas áreas do gerenciamento de operações das empresas. Foram verificados mais casos direcionados às áreas de Gestão de Tecnologia e Manufatura *Just-in-Time*. A maior parte dos casos analisados ainda é classificada em um nível de maturidade incipiente, restrito a atividades de monitoramento. Por fim, entre as tecnologias mais utilizadas para a implementação da Indústria 4.0 podem ser mencionados IoT, sistemas cyber-físicos e dispositivos móveis respectivamente.

Podem ser citadas duas principais contribuições da realização deste estudo. A primeira consiste na identificação da amplitude das contribuições da implementação da Indústria 4.0 no gerenciamento de operações. Não obstante o nível de maturidade desta implementação nas empresas analisadas ainda estar em estágio inicial, são verificadas contribuições nas mais variadas áreas do gerenciamento de operações. Este resultado evidencia o caráter sistêmico da Indústria 4.0 nas empresas. Apesar de algumas conceituações da Indústria 4.0 estarem restritas a troca de informações e autocontrole dos sistemas produtivos (Weyer et al., 2015), as aplicações que incorporam uma visão de integração da cadeia de valor (Kagermann et al., 2013; Hermann et al., 2016) apresentam grande aderência a diversidade dos casos analisados.

A segunda contribuição está direcionada a identificação de funcionalidades da aplicação da Indústria 4.0 no gerenciamento de operações, assim como as tecnologias empregadas permitem estabelecer um panorama mais amplo sobre o impacto da implementação deste tipo de tecnologia nas empresas. Apesar de não se apresentar um roteiro de implementação da Indústria 4.0, o levantamento e apresentação de casos de sucesso permite um maior

conhecimento sobre as potencialidades deste tipo de tecnologia e sua contribuição para as áreas de gerenciamento de operações. Além disso, a identificação de tecnologias 4.0 associadas a essas áreas pode ser utilizada como um direcionamento para a sua aplicação. Este resultado associado ao levantamento dos casos de sucesso pode contribuir para mitigar barreiras para a implementação da Indústria 4.0 nas empresas (Drath e Horch, 2014; Ford, 2015; Qin et al., 2016).

Por fim, as recomendações de trabalhos futuros estão direcionadas ao levantamento de mais casos de sucesso da implementação da Indústria 4.0, contribuindo para a disseminação das potencialidades de sua aplicação. Também podemos recomendar o desenvolvimento de *toolkits* básicos para a implementação restrita dessas tecnologias, capazes de superar suas barreiras de implementação inicial nos processos de manufatura tradicionais.

Referências

- Albers, A., Gladysz, B., Pinner, T., Butenko, V., Stürmlinger, T. (2016). Procedure for Defining the System of Objectives in the Initial Phase of an Industry 4.0 Project Focusing on Intelligent Quality Control Systems. *Procedia CIRP*, 52: 262-267.
- Almada-Lobo, F. (2016). The Industry 4.0 revolution and the future of manufacturing execution systems (MES). *Journal of Innovation Management*, 3(4): 16-21.
- Bagheri, B., Yang, S., Kao, H. A., & Lee, J. (2015). Cyber-physical Systems Architecture for Self-Aware Machines in Industry 4.0 Environment. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3): 1622-1627.
- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business horizons*, 55(2): 155-162.
- Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. *International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering*, 8(1), 37-44.
- Bruner, J. (2013). *Industrial Internet*. O'Reilly Media: USA.
- Choi, T. Y., Wacker, J. G. (2011). Theory Building in the OM/SCM Field: Pointing to the future by looking at the past. *Journal of Supply Chain Management*. 47(2): 8-11.
- CNI - Confederação Nacional da Indústria. (2016). Indústria 4.0: novo desafio para a indústria brasileira. http://www.portaldaindustria.com.br/relacoesdaotrabalho/media/publicacao/chamadas/SondEspecial_Industria4.0_Abril2016.pdf.
- Davis, J., T. Edgar, J. Porter, J. Bernaden, and M. Sarli. (2012). Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance. *Computers & Chemical Engineering*, v.47, p.145-156. Doi: 10.1016/j.compchemeng.2012.06.037
- Deloitte (2014). Industry 4.0 Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies.

<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/manufacturing/ch-en-manufacturing-industry-4-0-24102014.pdf>

Dou, R., & Nan, G. (2015). Optimizing sensor network coverage and regional connectivity in industrial IoT systems. *IEEE Systems Journal*, pp.1-10. Doi: 10.1109/JSYST.2015.2443045

Drath, R. & Horch, A. (2014). Industrie 4.0: Hit or Hype?. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, v.8, n.2, p.56-58. Doi: 10.1109/MIE.2014.2312079

Erensal, Y. C.; Oncan, T.; Demircan, M. L. (2006). Determining key capabilities in technology management using fuzzy analytic hierarchy process: A case study of Turkey. *Information Sciences*, 176: 2755–2770.

Evans, P.C., Annunziata, M. (2012). Industrial internet: pushing the boundaries of minds and machines. General Electric. Available at: https://www.ge.com/docs/chapters/Industrial_Internet.pdf. Accessed in 24/05/2017.

Everitt, B. S. (1992). *The analysis of contingency tables*. CRC Press.

Ford, M. (2015). Industry 4.0: Who benefits? *SMT Surface Mount Technology Magazine*, v.30, n.7 , p.52-55.

Fullerton, R. R., McWatters, C. S. (2001). The production performance benefits from JIT implementation. *Journal of Operations Management*, 19: 81–96.

Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. *Proceedings of 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, Koloa/HI, USA. pp. 3928-3937. Doi: 10.1109/HICSS.2016.488

Hitt, M. A, Xu, K., Carnes, C. M. (2016). Resource based theory in operations management research. *Journal of Operations Management*, 41: 77-94.

Hozdić, E. (2015). Smart Factory for Industry 4.0: A Review. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2(1): 2067–3604.

Jagoda, K., Kiridena, S. (2015) Operations strategy processes and performance: Insights from the contract apparel manufacturing industry. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 26(2): 261-279.

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.

Kaynak, H. (2003). The relationship between total quality management practices and their effects on firm performance. *Journal of Operations Management*, 21: 405–435.

Kluth, A., Jäger, J., Schatz, A., Bauernhansl, T. (2014). Method for a Systematic Evaluation of Advanced Complexity Management Maturity. *Procedia CIRP*, 19: 69-74.

Kosieradzka, A. (2017). Maturity Model for Production Management. *Procedia Engineering*, 182: 342-349.

- Kwak, Y. H.; Ibbs, C. W. (2002). Project Management Process Maturity (PM) 2 Model. *Journal of Management in Engineering*, 18(3): 150-155.
- Lanza, G., Haefner, B., & Kraemer, A. (2015). Optimization of selective assembly and adaptive manufacturing by means of cyber-physical system based matching. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 64(1), 399-402.
- Lasi, H. & Kemper, H.G. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, v.4. Doi: 10.1007/s12599-014-0334-4
- Lee, I., Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58(4): 431-440.
- Lee, J., Bagheri, B., Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3:18-23.
- Lee, J., Kao, H. A., Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment. *Procedia Cirp*, 16: 3-8.
- Liao, Y., Deschamps, F, Loures, E. F. R., Ramos, L. F. P. (2017). Past, presente and future of Industry 4.0 – a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*.
- Linton, J. D., Klassen, R. Jayaraman, V. (2007). Sustainable supply chains: An introduction. *Journal of Operations Management*, 25: 1075–1082.
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A Survey on Technologies, Applications and Open Research Issues. *Journal of Industrial Information Integration*.
- Malhotra, M.K., Steele, D. C., Grover, V. (1994). Important Strategic and Tactical Manufacturing Issues in the 1990s. *Decision Sciences*, 25(2): 189-214.
- Monostori, L. (2014). Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. *Procedia CIRP*, 17: 9-13.
- Paulk, M., Curtis, B., Chrissis, M.B., Weber, C.V. (1993). Capability Maturity Model for Software. *Encyclopedia of Software Engineering*.
- Pavitt, K. (1990). What We Know about the Strategic Management of Technology. *California Management Review*, 32 (3): 17-26.
- Plataform Industrie 4.0. Map of Industrie 4.0 use cases. Disponível em: <<http://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/EN/InPractice/Map/map.html>>. Acessos nos dias: 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 de abr 2017.
- Porter, M. E., Heppelmann, J. E. (2015). How Smart, Connected Products are Transforming Competition. *Harvard Business Review*.
- Ptak, C. (1987), *MRP and Beyond: A Toolbox for Integrating People and Systems*, Irwin, Chicago, IL.

PwC - PricewaterhouseCoopers. (2016). Global Industry 4.0 Survey. Industry 4.0: Building the digital enterprise. <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>

Qin, J., Liu, Y., Grosvenor, R. (2016). A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. *Procedia CIRP*, 52: 173-178.

Rockwell Automation. (2014). The Connected Enterprise Maturity Model. http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/cie-wp002_-en-p.pdf

RRI - Robotic Revolution Initiative. Map of Industrie 4.0 use cases. Disponível em: <<http://usecase.jmfrri.jp/#/en>>. Acessos nos dias: 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 de abr 2017.

Rungtusanatham, M. J., Choi, T. Y., Hollingworth, D. G., Wu, Z., Forza, C. (2003). Survey research in operations management: historical analyses. *Journal of Operations Management*, 21: 475-488.

Schumacher, A., Erol, S., & Sihm, W. (2016). A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. *Procedia CIRP*, 52, 161-166.

Shafiq, S. I., Sanin, C., Szczerbicki, E., & Toro, C. (2015). Virtual engineering object/virtual engineering process: a specialized form of cyber physical system for Industrie 4.0. *Procedia Computer Science*, v.60, p.1146-1155. Doi: 10.1016/j.procs.2015.08.166

Shrouf, F., Ordieres, J., Miragliotta, G. (2014). Smart Factories in Industry 4.0: A Review of the Concept and of Energy Management Approached in Production Based on the Internet of Things Paradigm. *Procedimentos do International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 9-12 de dezembro, Selangor Darul Ehsan, Malaysia.

Sonntag, D., Zillner, S., Van der Smagt, P., & Lörincz, A. (2017). Overview of the CPS for Smart Factories Project: Deep Learning, Knowledge Acquisition, Anomaly Detection and Intelligent User Interfaces. *Industrial Internet of Things*. Springer International Publishing, pp. 487-504).

Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40: 536-541.

Sullivan, R. S. (1982). The service sector: Challenges and imperatives for research in operations management. *Journal of Operations Management*. 2(4): 211-214.

Swanson, C. A., Lankford, W. M. (1998). Just-in-time manufacturing. *Business Process Management Journal*, 4(4): 333-341.

Tamás, P., B. Illés, and P. Dobos. (2016) Waste reduction possibilities for manufacturing systems in the industry 4.0. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 161(1).

Terziovski, M. (2006). Quality management practices and their relationship with customer satisfaction and productivity improvement. *Management Research News*, 29(7): 414-424.

Thames, L., & Schaefer, D. (2016). Software-defined Cloud Manufacturing for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 52: 12-17.

Weyer, S., Schmitt, M., Ohmer, M., Gorecky, D. (2015). Towards Industry 4.0 – Standardization as the Crucial Challenge for Highly Modular, Multi-vendor Production Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3): 579-584.

Wiesmüller, M. (2014). Industrie 4.0: surfing the wave? *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 131(7): 197-197.

Zehner, W. B. (2000). The Management of Technology (MOT) Degree: A Bridge Between Technology and Strategic Management, *Technology Analysis & Strategic Management*, 12(2): 283-291

Zeng, J., Anh, P. C., Matsui, Y. (2013). "Shop-floor communication and process management for quality performance". *Management Research Review*, 36(5): 454 - 477.

Zuehlke, D. (2010). SmartFactory—Towards a factory-of-things. *Annual Reviews in Control*, 34(1): 129-138.

Apêndice A – Casos Analisados

Empresa	Tecnologias Adotadas	Área de PCP	Nível de Maturidade Tecnológica	Referência
Fraunhofer IWU e iMain	Computação em nuvem; IoT	Manufatura Just-in-Time Gestão de Tecnologia	Monitoramento	http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Use-Cases/352-fraunhofer-iwu-imain-en/article-fraunhofer-iwu-imain.html
Informantis	Realidade aumentada; IoT	Gestão da Tecnologia	Monitoramento	http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Use-Cases/106-intelligente-wearables-for-identifying-danger/article-intelligente-wearables-for-identifying-danger.html
Acs Automotive center	Análise e processamento de dados; IoT	Manufatura Just-in-Time Gestão de Tecnologia	Otimização	http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Use-Cases/340-automotive-center-zero-mistakes/article-automotive-center.html
Wolffkran	IoT	Manufatura Just-in-Time Gestão de Tecnologia	Controle	http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Use-Cases/344-insys-icom-en/article-insys-microelectronics.html
Bosch Packaging	Computação em nuvem; IoT	Manufatura Just-in-Time; Gestão de Tecnologia; Gestão da Cadeia de Suprimentos	Controle	http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Use-Cases/325-it-shopfloor-solutions-bosch/article-it-shopfloor-solutions-bosch.html
HBM	Análise e processamento de dados; IoT	Gestão de Qualidade; Manufatura Just-in-Time Gestão da Tecnologia	Otimização	http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Use-Cases/253-measurement-technology-for-both-development-and-production-hottinger-baldwin/article-measurement-technology-for-both-development-and-production.html
Volkswagen	Realidade aumentada	Manufatura Just-in-Time; Gestão de Tecnologia;	Monitoramento	http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Use-Cases/261a-xpick-ubimax-volkswagen-en/article-pick-by-vision.html

		Gestão da Cadeia de Suprimentos		
Thyssenkrupp	Dispositivos móveis; IoT; Sistemas cyber-físico	Manufatura Just-in-Time; Gestão de Tecnologia; Gestão da Qualidade; Gestão da Cadeia de Suprimentos	Controle	http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Use-Cases/077-camshaft-production-in-ilsenburg/article-camshaft-production-in-ilsenburg.html
Lenze	IoT	Gestão da Qualidade; Manufatura Just-in-Time; Gestão da Cadeia de Suprimentos Gestão de Tecnologia	Monitoramento	http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Use-Cases/322-lenze-traceability-of-electronic-devices/article-traceability-of-electronic-devices.html
CHT	Sistemas cyber-físico	Gestão da Tecnologia; Manufatura Just-in-Time	Controle	http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Use-Cases/364-cht-crosslinked-process-control/article-cht.html
Ruch NovaPlast	Sistemas cyber-físico	Manufatura Just-in-Time; Gestão de Tecnologia	Controle	http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Use-Cases/139-producing-more-efficient-mes-hydra/article-producing-more-efficient-with-mes-hydra.html
Bender	IoT; Sistemas cyber-físico	Manufatura Just-in-Time; Gestão da Tecnologia; Estratégia de Operações	Monitoramento	http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Use-Cases/260-bender-final-assembly-plant/bender-final-assembly-plant.html
Voith Turbo	IoT; Sistemas cyber-físico	Manufatura Just-in-Time;	Monitoramento	http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Use-Cases/345-armbruster-engineering-en/article-armbrutster-engineering.html

		Gestão de Tecnologia; Estratégia de Operações		
Humanitarian Logistics Organisation (HLO)	Dispositivos móveis; IoT	Gestão da Cadeia de Suprimentos Gestão de Tecnologia	Monitoramento	http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Use-Cases/057-integrated-humanitarian-logistics-at-hlo/article-integrated-humanitarian-logistics-at-hlo.html
Audi	Realidade aumentada; IoT	Gestão da Qualidade Gestão de Tecnologia	Monitoramento	http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Use-Cases/064-motioneap-assistive-systems-integrated-directly-into-the-workplace/article-motioneap-assistive-systems-integrated-directly-into-the-workplace.html
Gifu Tada Seiki	IoT	Gestão da Qualidade; Gestão de Tecnologia; Manufatura Just-in-Time	Monitoramento	http://usecase.jmfri.jp/#/en
Fujitsu	Computação em nuvem; IoT	Gestão de Tecnologia; Estratégia de Operações	Monitoramento	http://usecase.jmfri.jp/#/en
Hitach	Sistemas cyber-físico	Gestão de Tecnologia; Manufatura Just-in-Time	Monitoramento	http://usecase.jmfri.jp/#/en
Mazda	Análise e processamento de dados	Estratégia de Operações; Gestão de Tecnologia; Gestão da Cadeia de Suprimentos	Monitoramento	http://usecase.jmfri.jp/#/en
Paltek	Computação em nuvem; IoT	Gestão de Tecnologia;	Monitoramento	http://usecase.jmfri.jp/#/en

NEC	Análise de dados e algoritmos; avançados	Gestão da Cadeia de Suprimentos Gestão de Tecnologia	Monitoramento	http://usecase.jmfri.jp/#/en
IHI	Computação em nuvem; Dispositivos móveis; IoT; Sistemas cyber-físico	Manufatura Just-in-Time; Gestão da Cadeia de Suprimentos; Gestão de Tecnologia	Monitoramento	http://usecase.jmfri.jp/#/en
Mitsubishi Electric Corporation	Computação em nuvem; IoT.	Manufatura Just-in-Time; Estratégia de Operações; Gestão de Tecnologia; Gestão da Cadeia de Suprimentos	Monitoramento	http://usecase.jmfri.jp/#/en
SANYO DENKI	IoT	Gestão de Tecnologia; Gestão da Qualidade	Monitoramento	http://usecase.jmfri.jp/#/en
JIN	Computação em nuvem; Dispositivos móveis	Gestão de Tecnologia	Monitoramento	http://usecase.jmfri.jp/#/en
Cosel	IoT; Sistemas cyber-físico	Manufatura Just-in-Time; Gestão da Tecnologia	Monitoramento	http://usecase.jmfri.jp/#/en
Nakamura-Tome Precision Industry	Dispositivos móveis; IoT	Manufatura Just-in-Time; Estratégia de Operações; Gestão de Tecnologia	Monitoramento	http://usecase.jmfri.jp/#/en

Nome não disponibilizado	IoT; Sistemas cyber-físico	Manufatura Just-in-Time; Gestão de Tecnologia	Monitoramento	http://usecase.jmfri.jp/#/en
Kubota	IoT; Dispositivos móveis	Gestão de Tecnologia; Estratégia de Operações	Monitoramento	http://usecase.jmfri.jp/#/en
Polibol	IoT	Manufatura Just-in-Time Gestão de Tecnologia	Monitoramento	http://www.libelium.com/smart-factory-reducing-maintenance-costs-ensuring-quality-manufacturing-process/
Inblay Technology	IoT	Manufatura Just-in-Time Gestão de Tecnologia	Monitoramento	http://www.libelium.com/preventive_maintenance_industrial_motors_m2m/
Harley- Davidson	Sistemas cyber-físico	Manufatura Just-in-Time Gestão de Tecnologia Gestão da Qualidade Estratégia de Operações	Controle	https://daue6ehqissah.cloudfront.net/breakouts/2014/0921_V-MAN-01_Manufacturing%20Business.pdf
De Walt	IoT	Manufatura Just-in-Time Gestão de Tecnologia	Monitoramento	https://daue6ehqissah.cloudfront.net/breakouts/2014/0904_MEG-02-IoT%20Customer%20Panel-Best%20Practices.pdf
Stanley Black & Decker	IoT	Gestão da Tecnologia Gestão da Cadeia de Suprimentos	Autonomia	http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/industries/manufacturing/connected-factory/automation/stanley-black-decker.html
Heidelberger Druckmaschinen AG	IoT	Manufatura Just-in-Time Gestão de Tecnologia	Monitoramento	http://www.ptc.com/~media/Files/PDFs/Case-Studies/J6684%20Heidelberg%20CS_EN_v1b.pdf?la=en
CNH Industrial N.V.	IoT	Manufatura Just-in-Time	Monitoramento	http://www.ptc.com/~media/Files/PDFs/IoT/J6081_CNH_Industrial_Case_Study_Final_11-12-15.pdf?la=en

		Gestão de Tecnologia		
Orbotech	Dispositivos móveis; IoT	Manufatura Just-in-Time Gestão de Tecnologia Estratégia de Operações	Monitoramento	http://www.ptc.com/internet-of-things/customer-success/orbotech