



IMPLEMENTAÇÃO DA PRODUÇÃO ENXUTA E INDÚSTRIA 4.0 EM EMPRESAS BRASILEIRAS DE MANUFATURA

IMPLEMENTATION OF LEAN PRODUCTION AND INDUSTRY 4.0 IN BRAZILIAN MANUFACTURING COMPANIES

Guilherme Luz Tortorella¹

Diego Fetterman²

Ricardo Giglio³

Gabriela Aline Borges⁴

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo avaliar a relação entre as práticas de Produção Enxuta (PE) e a implementação da indústria 4.0 em empresas brasileiras de manufatura. Para tal, utilizamos dados de uma pesquisa realizada com 55 empresas de diferentes portes e setores, em diferentes estágios de implementação de PE. Os dados coletados foram avaliados por meio de análise multivariada. Nossos resultados indicam que as práticas de PE estão positivamente associadas às tecnologias da Indústria 4.0 e suas implementações simultâneas levam a melhorias de desempenho maiores. Além disso, as variáveis contextuais investigadas contribuem para essa associação, embora nem todos os aspectos contribuam em mesma extensão e efeito

Palavras-chave: Produção Enxuta. Indústria 4.0. Economias emergentes.

ABSTRACT: *Thus, this paper aims to examine the relationship between Lean Production (LP) practices and the implementation of Industry 4.0 in Brazilian manufacturing companies. To achieve that we use data from a survey carried out with 55 companies of different sizes and sectors, at different stages of LP implementation. Data collected was analyzed by means of multivariate analysis. Our findings indicate that LP practices are positively associated with Industry 4.0 technologies and their concurrent implementation leads to larger performance improvements. Further, the contextual variables investigated do matter to this association, although not all aspects matter to the same extent and effect.*

Keywords: *Lean Production. Industry 4.0. Emerging economies*

¹Professor. Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: gtortorella@bol.com.br

²Professor. Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: dfettermann@gmail.com

³Professor. Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: rgiglio@gmail.com

⁴Estudante de mestrado do departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: gabriela.abo@gmail.com



1 INTRODUÇÃO

A implementação de equipamentos de automação aumenta a qualidade do produto, ao mesmo tempo em que torna os processos de fabricação mais eficientes (LANDSCHEIDT; KANS, 2016). Essa tendência é especialmente verdadeira quando se leva em consideração a transformação que muitas indústrias estão passando como resultado da Indústria 4.0 (LASI et al., 2014). O desenvolvimento e a integração da automação digital da produção por meio de eletrônicos, tecnologia da informação (TI) e robôs industriais, levaram a sistemas de manufatura, atualmente designados como Cyber-Physical Systems (CPS), que permitem uma produção altamente customizada e em massa (KAGERMANN et al., 2013). No entanto, a forma como as tecnologias da Indústria 4.0 são integradas nos sistemas de produção e os processos que eles podem suportar ainda estão sendo estudados (KOLBERG et al., 2016).

Ao contrário da crença convencional, pesquisadores afirmam que a automação não levará a uma menor interação humana, nem a redução de trabalhadores (DWORSCHAK e ZAISER, 2014). Na verdade, os requisitos e habilidades dos indivíduos são propensos a aumentar e tornar-se mais especializados. Contudo, o nível de investimento de capital subjacente às tecnologias da Indústria 4.0 é bastante alto, reduzindo a sua atratividade (SANDERS et al., 2016), especialmente para as empresas localizadas no contexto das economias em desenvolvimento (ANDERL, 2014).

A Produção Enxuta (PE), por outro lado, é uma abordagem amplamente disseminada que visa reduzir o desperdício e melhorar a produtividade e a qualidade de acordo com os requisitos dos clientes (WOMACK et al., 2007), além de ser de baixa tecnologia, simples e eficaz geralmente alinhado a uma visão de negócios compartilhada. Além disso, Spear (2009) comenta que um processo eficaz de resolução de problemas é fundamental em um sistema enxuto, pois fornece o desenvolvimento tanto dos processos organizacionais como dos indivíduos que o realizam. Sibatrova e Vishnevskiy (2016) afirmam que a Indústria 4.0 impactará a PE, permitindo superar as barreiras atualmente existentes e trazendo novos desafios para uma implementação bem-sucedida. Contudo, Kolberg et al. (2016), e Gjeldum et al. (2016), apontaram que há uma falta de estudos que investigam empiricamente a relação entre uma implementação enxuta bem-sucedida e a progressão para a Indústria 4.0.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo examinar a relação entre as práticas de PE e a implementação da Indústria 4.0 dentro de um contexto de economia em



desenvolvimento, como o Brasil. Para isso, utilizamos dados de uma pesquisa realizada em 55 empresas de diferentes portes e setores, em diferentes estágios de implementação de PE. Os entrevistados forneceram respostas para quatro questionários: Q1, que descreveu as variáveis contextuais das empresas, identificadas na literatura como influentes na adoção de ambas as abordagens; Q2, que avaliou o nível de implementação de 41 práticas de PE inter-relacionadas e consistentes; Q3, que identificou o nível de adoção de 10 tecnologias inter-relacionadas da Indústria 4.0; e Q4, que tinha como objetivo identificar a melhoria do desempenho operacional dentro das empresas nos últimos anos.

A abordagem analítica adotada usa análises de grupos para agrupar empresas de acordo com (i) nível de implementação enxuta (derivado de Q2), (ii) adoção de tecnologias de Indústria 4.0 (derivado de Q3) e (iii) sua melhoria de desempenho observada (Q4). Uma vez identificados os grupos homogêneos de empresas, verificamos as diferenças significativas nos níveis de variáveis contextuais (Q1) entre os grupos e chegamos às conclusões. O restante do artigo está estruturado da seguinte forma: a seção 2 apresenta o referencial teórico; a seção 3 descreve o método proposto; os resultados de sua aplicação são apresentados na seção 4 e; a seção 5 encerra o documento apresentando conclusões e oportunidades de pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Indústria 4.0

O termo "Indústria 4.0" descreve uma indústria com máquinas conectadas, produtos e sistemas inteligentes, e soluções inter-relacionadas. Tais aspectos estabelecem unidades de produção inteligentes que monitoram e controlam os dispositivos físicos (LASI et al., 2014). Nesse sentido, a Indústria 4.0 visa uma produção autônoma e dinâmica, que integra Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) para permitir uma produção em massa de produtos altamente customizados.

Apesar da crescente notoriedade, empresas ainda lutam para entender a Indústria 4.0 e seus conceitos e princípios (SANDERS et al., 2016). Erol et al. (2016) afirmam que as empresas geralmente têm problemas para determinar seu estado atual quanto ao desenvolvimento da Indústria 4.0 e, por isso, não conseguem identificar campos concretos de ação. Para facilitar e orientar a implementação da Indústria 4.0, alguns modelos de roteiro ou maturidade foram propostos (QIN et al., 2016).

Lee et al. (2015) sugerem uma estrutura de CPS de 5 níveis: (i) conexão inteligente, (ii) conversão de dados para informação, (iii) cyber, (iv) conhecimento e (v) configuração. Anderl (2014) sugere a utilização de um roteiro de implementação prático denominado "Toolbox



Indústria 4.0", estruturado em seis dimensões e cinco níveis de desenvolvimento. Por sua vez, o governo alemão propôs um modelo de maturidade para avaliação da Indústria 4.0 com 62 itens agrupados em nove dimensões, são elas: estratégia, liderança, clientes, produtos, operações, cultura, pessoas, governança e tecnologia (SCHUMACHER et al., 2016). No contexto das pequenas e médias empresas (PME), Ganzarain e Errasti (2016) sugerem um modelo de maturidade de três estágios relativo à Indústria 4.0, que são: visualizar, habilitar e implementar.

Especificamente dentro do contexto das economias em desenvolvimento, como o Brasil, a Confederação Nacional da Indústria (2016) realizou uma pesquisa para identificar os desafios existentes ao implementar tecnologias da Indústria 4.0. Os altos custos foram apontados como a principal barreira interna, enquanto a falta de trabalhadores qualificados o maior desafio entre os fatores externos. No geral, dez tecnologias digitais agrupadas em três áreas de aplicação diferentes foram identificadas, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1

Tecnologias digitais avaliadas no contexto industrial brasileiro

Foco	Tecnologia
Processo	i1- Automação digital sem sensores
	i2- Automação digital com sensores de controle de processo
	i3- Monitoramento remoto e controle da produção através de sistemas como MES * e SCADA **
	i4- Automação digital com sensores para identificação de condições de produtos e operações, linhas flexíveis
Desenvolvimento/re dução no tempo de mercado	i5- Sistemas integrados de engenharia para desenvolvimento de produtos e fabricação de produtos
	i6- Fabricação de aditivos, prototipagem rápida ou impressão em 3D
	i7- Simulações/análise de modelos virtuais (elementos finitos, dinâmica computacional de fluidos, etc.) para projeto e comissionamento
Produto / novos modelos comerciais	i8- Coleta, processamento e análise de grandes quantidades de dados (dados importantes)
	i9- Uso de serviços na nuvem associados ao produto
	i10- Incorporação de serviços digitais em produtos (Internet of Things ou Sistemas de Serviços de Produtos)

* MES - Manufacturing Execution Systems (Sistemas de Execução de Fabricação)

** SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition (Controle de Supervisão e Aquisição de Dados)

Fonte: Adaptado da Confederação Nacional da Indústria (2016)



2.1 Produção Enxuta e a Indústria 4.0

Os pesquisadores geralmente concordam sobre várias práticas enxutas sobrepostas (MARODIN; SAURIN, 2013), e sua associação positiva com o desempenho operacional (SHAH; WARD, 2003; JASTI; KODALI, 2016). Em geral, a PE pode ser implementada em uma parte ou em toda a empresa, bem como em toda a cadeia de suprimentos (HINES et al., 2004). No entanto, é mais comum começar pela aplicação de práticas de PE no chão de fábrica (SHAH; WARD, 2007), pois servem como uma forma de introduzir progressivamente princípios de PE (MANN, 2005).

A seleção de práticas de PE adequadas e a identificação de sua aplicabilidade em um ambiente operacional apresentam um desafio adicional para o gerenciamento (HERRON; BRAIDEN, 2006). Apesar disso, medir a maturidade da implementação de PE com base na avaliação do nível de adoção de práticas pré-definidas tem sido amplamente utilizada (SHAH; WARD, 2007; NETLAND; FERDOWS, 2014).

A recente integração entre as práticas de PE e as tecnologias da Indústria 4.0 foi denotada como Automação Enxuta (AE), e visa maior flexibilidade e fluxos de informações mais curtos para atender às futuras demandas do mercado (KOLBERG; ZÜEHLKE, 2015). Dado aos potenciais benefícios da implementação das tecnologias da Indústria 4.0, alguns autores (como, SANDERS et al., 2016; GJELDUM et al., 2016) têm argumentado a existência de novas áreas de aplicação da AE. Contudo, as abordagens atuais geralmente precisam ser adaptadas às necessidades individuais.

Evidências encontradas na literatura indicam que a compreensão dessa associação de PE e Indústria 4.0 e seu impacto no desempenho operacional ainda precisam ser melhor explorados (EROL et al., 2016; SANDERS et al., 2016). Neste estudo, examinamos a relação entre a implementação simultânea de PE - representada por 41 práticas (ver Tabela 2) propostas e validadas por Shah e Ward (2007) - e da Indústria 4.0, e sua influência no desempenho operacional das empresas.

Tabela 2

Práticas e estruturas da PE

Estruturas fundamentais	Estruturas operacionais	Práticas da produção enxuta
Relacionado ao fornecedor	Feedback fornecedor	do pe1- Frequentemente estamos em contato direto com nossos fornecedores



		<p>pe2- Damos aos nossos fornecedores feedback sobre qualidade e desempenho de entrega</p> <p>pe3- Nós nos esforçamos para estabelecer relações de longo prazo com nossos fornecedores</p>
	Entrega JIT	<p>pe4- Os fornecedores estão diretamente envolvidos no processo de desenvolvimento de novos produtos</p> <p>pe5- Nossos principais fornecedores realizam as entregas em nossas plantas no modo JIT</p> <p>pe6- Temos um programa formal de certificação de fornecedores</p>
	Fornecedores em desenvolvimento	<p>pe7- Nossos fornecedores estão contratualmente comprometidos com redução anual de custos</p> <p>pe8- Nossos principais fornecedores estão localizados nas proximidades de nossas plantas</p> <p>pe9- Temos comunicação de nível corporativo sobre questões importantes com os principais fornecedores</p> <p>pe10- Tomamos medidas ativas para reduzir o número de fornecedores em cada categoria</p> <p>pe11- Nossos principais fornecedores gerenciam nosso inventário</p> <p>pe12- Avaliamos fornecedores com base no custo total e não por preço unitário</p>
Relacionado ao cliente	Cientes envolvidos	<p>pe13- Frequentemente estamos em contato direto com nossos clientes</p> <p>pe14- Nossos clientes nos dão feedback sobre qualidade e desempenho de entrega</p> <p>pe15- Nossos clientes estão ativamente envolvidos em ofertas de produtos atuais e futuras</p> <p>pe16- Nossos clientes estão diretamente envolvidos em ofertas de produtos atuais e futuras</p> <p>pe17- Nossos clientes compartilham frequentemente informações de demanda atuais e futuras com o departamento de marketing</p>
Internamente relacionados	Sistema puxado	<p>pe18- A produção é puxada pelo envio de produtos acabados</p> <p>pe19- A produção nas estações é puxada pela demanda atual da próxima estação</p> <p>pe20- Usamos um sistema de produção puxada</p> <p>pe21- Usamos kanban, quadros, ou recipientes de sinais para controle de produção</p>



Fluxo	pe22- Os produtos são classificados em grupos com requisitos de processamento semelhantes
	pe23- Os produtos são classificados em grupos com requisitos de encaminhamentos semelhantes
	pe24- Equipamento é agrupado para produzir um fluxo contínuo de famílias de produtos
	pe25- Famílias de produtos determinam nosso layout de fábrica
Setup curto	pe26- Nossos funcionários praticam setup para reduzir o tempo necessário
	pe27- Estamos trabalhando para reduzir os tempos de setup em nossa planta
	pe28- Temos tempos de setup baixos em nossa planta
c8- Processos controlados	pe29- Grande número de equipamentos/processos no chão de fábrica estão atualmente sob controle estatístico de processo
	pe30- Uso extensivo de técnicas estatísticas para reduzir a variância do processo
	pe31- Gráficos mostrando taxas de defeito são usados como ferramentas no chão de fábrica
	pe32- Usamos diagramas do tipo espinha de peixe para identificar causas de problemas de qualidade
	pe33- Realizamos estudos de capacidade de processo antes do lançamento do produto
c9- Funcionários envolvidos	pe34- Os funcionários de chão de fábrica são a chave para as equipes de resolução de problemas
	pe35- Os funcionários de chão de fábrica dirigem programas de sugestão
	pe36- Os funcionários de chão de fábrica lideram esforços de melhoria de produtos / processos
	pe37- Os funcionários de chão de fábrica passam por treinamento funcional
c10- Manutenção produtiva	pe38- Dedicamos uma parcela diárias às atividades relacionadas à manutenção de equipamentos planejada
	pe39- Mantemos todos os nossos equipamentos regularmente
	pe40- Mantemos registros excelentes de todas as atividades relacionadas à manutenção de equipamentos
	pe41- Publicamos registros de manutenção de equipamentos no chão de fábrica para compartilhamento ativo com funcionários

Fonte: Adaptada de Shah e Ward (2007)



3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Existem três etapas para o método de pesquisa aqui proposto: (i) desenvolvimento de questionários e coleta de dados, (ii) agrupamento de dados e (iii) análise de dados. Essas etapas são detalhadas nas seções a seguir.

3.1 Desenvolvimento de questionários e coleta de dados

Um estudo recente de Kull et al. (2014) sugere que a cultura nacional pode influenciar a implementação de práticas enxutas. Como nosso estudo está focado no contexto das empresas de manufatura brasileiras, a amostra limita-se a essas empresas. Além disso, os entrevistados devem ter experiência em PE e estarem cientes das tecnologias da Indústria 4.0. Devido a esses critérios, a amostra incluiu empresas de diferentes setores industriais devido ao número limitado de empresas no Brasil adotando as práticas de PE e minimamente iniciadas na Indústria 4.0. Somado a isso, a disseminação das práticas em todo o espectro industrial é desconhecida (TORTORELLA et al., 2015), o que justifica nossa amostra de indústrias intersetorial.

O questionário foi enviado por e-mail para 265 empresas que preencheram os critérios de seleção. Um primeiro e-mail foi enviado em janeiro de 2017 e outros dois nas semanas seguintes. A amostra final resultante compreende 55 respostas válidas que representam uma taxa de resposta de 20,75%. Essa taxa de resposta é superior à taxa média de 15% em surveys de gestão (HAIR et al., 2006), contudo, testamos a possível tendência de não resposta usando o procedimento de Armstrong e Overton (1977). Assim, avaliamos as diferenças entre os primeiros ($n_1 = 23$) e os últimos respondentes ($n_2 = 32$) usando o teste de Levene para a igualdade de variâncias e um teste-T para a igualdade de meios.

A amostra apresenta uma quantidade equilibrada de empresas para cada variável contextual (ver Tabela 3). A maioria dos entrevistados era de grandes empresas (67,3%); a maioria das empresas pertencia ao setor metal-mecânico (61,8%) e a maioria (70,9%) iniciou sua implementação de PE há mais de 2 anos.

Tabela 3

Características da amostra

Tamanho da empresa		
Pequena e média (< 500 funcionários)	18	32.7%
Grande (> 500 funcionários)	37	67.3%
Setor industrial		



Metal-mecânico	34	61.8%
Têxtil	6	10.9%
Automotivo	4	7.2%
Alimentício	3	5.4%
Outros	8	14.6%
Implementação de PE na empresa		
≤2 anos	16	29.1%
>2 anos	39	70.9%

A primeira parte do questionário teve como objetivo coletar informações demográficas dos entrevistados e suas empresas. A segunda parte avaliou o nível de adoção de práticas de PE com base no modelo de avaliação de Shah e Ward (2007). Cada prática é descrita em uma afirmação que foi avaliada de acordo com uma escala de Likert que variou de 1 (totalmente em desacordo) a 5 (totalmente de acordo). A terceira parte do questionário visava medir o grau de adoção das tecnologias da Indústria 4.0 dentro das empresas. Para isso, 10 questões foram formuladas de acordo com diferentes tecnologias, como sugerido pela Confederação Nacional da Indústria Brasileira (2016). Da mesma forma, o grau de adoção foi medido em uma escala de Likert variando de 1 (não usado) a 5 (totalmente adotado). Finalmente, a quarta parte avaliou a melhoria do desempenho operacional observada nos últimos três anos, de acordo com cinco indicadores: (i) produtividade, (ii) nível de entrega de serviço, (iii) nível de estoque, (iv) segurança no trabalho (acidentes) e (v) qualidade (refugo e retrabalho). Uma escala variando de 1 (piorou significativamente) até 5 (melhorou significativamente) foi utilizada no questionário.

Além disso, testamos todas as respostas relacionadas às 41 práticas de PE, 10 tecnologias da Indústria 4.0 e os 5 indicadores de desempenho para a confiabilidade, determinando os valores alfa de Cronbach e utilizando um limiar alfa de 0,6 ou superior (MEYERS et al., 2006). As respostas apresentaram alta confiabilidade, com um valor alfa global de 0,993, 0,857 e 0,834, respectivamente. A validação externa das questões de implementação de PE não foi realizada, uma vez que essas questões são amplamente utilizadas e validadas na literatura (SHAH e WARD, 2007); eles foram considerados pertencentes a uma única dimensão, Nível de Implementação Enxuta. Da mesma forma, para as tecnologias da Indústria 4.0, a dimensão indicada como Nível de Indústria 4.0 foi determinada.



3.1 Agrupamento de dados

Nesta etapa, realizamos três agrupamentos das observações usando as variáveis: (i) nível de implementação de práticas de PE, (ii) nível de adoção de tecnologias da Indústria 4.0 e (iii) melhoria de desempenho operacional. Em todos os agrupamentos realizados na mesma amostra de observações, primeiro aplicamos um método hierárquico para identificar o número adequado (digamos k) de agrupamentos - através do método de Ward - e então o método de agrupamento k -means, para reorganizar observações em k agrupamentos. Veja Rencher (2002) para mais detalhes.

Usando a variável “nível de implementação das práticas de PE”, identificaram-se dois grupos. Uma ANOVA (Análise de Variância) foi realizada e para todas as 41 variáveis de agrupamento, mostrando diferenças significativas nas médias (p -valores $<0,05$). As 24 observações atribuídas ao grupo 1 apresentaram uma média alta no nível de adoção de práticas de PE, e o grupo foi identificado como APE (alto nível de implementação da PE); as 31 observações atribuídas ao grupo 2 apresentaram um nível médio baixo de adoção de práticas PE, e o grupo foi identificado como BPE.

Ao usar a variável “nível de adoção de tecnologias da Indústria 4.0”, foram identificados dois grupos. Entre as 10 variáveis de agrupamento, uma ANOVA identificou diferenças significativas nas médias (p -valores $<0,01$). As 39 observações atribuídas ao grupo 1 apresentaram um nível médio baixo de adoção das tecnologias Indústria 4.0, e o grupo foi identificado BTC (baixo nível de implementação de tecnologias da Indústria 4.0); as 16 observações atribuídas ao grupo 2 apresentaram um nível médio alto de adoção das tecnologias da Indústria 4.0, e o grupo foi rotulado de ATC (alto nível de implementação de tecnologias da Indústria 4.0).

Finalmente, uma terceira análise de agrupamento foi realizada levando em consideração a melhoria do desempenho operacional. Os resultados para os cinco indicadores de desempenho apontaram a existência de dois grupos, cujas diferenças significativas nas médias (p -valores $<0,01$) foram verificadas através de uma ANOVA. O primeiro grupo corresponde a 21 observações cujo nível médio de melhoria do desempenho operacional foi baixo, sendo denominado BMD (baixo nível de melhoria de desempenho); o segundo grupo é composto pelas 34 observações restantes que apresentaram um nível médio alto de melhoria do desempenho operacional, e identificado por AMD (alto nível de melhoria de desempenho).



3.1 Análise dos dados

Após os três conjuntos de agrupamentos serem identificados testamos então, as diferenças por meio de duas variáveis contextuais (tamanho da empresa e tempo de implementação de PE na empresa) entre grupos em cada conjunto.

Primeiro verificamos os dados usando o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) e descobrimos que os dados da amostra não seguem uma distribuição normal (p-valor <0,05). Identificamos, então, técnicas não paramétricas adequadas para analisar os dados em questão. Uma vez que estamos usando as dimensões obtidas a partir da análise de agrupamento, essas variáveis foram consideradas como categóricas, permitindo a aplicação do teste qui-quadrado com tabelas de contingência e ajuste residual. Da mesma forma, para a análise das variáveis contextuais, que são categóricas, aplicamos o mesmo procedimento (TABACHNICK; FIDELL, 2013).

Primeiro, testamos se a frequência de observações do grupo de implementação de PE (BPE e APE) foi associada ao nível de adoção das tecnologias Indústria 4.0 (BTC e ATC) de acordo com o nível de melhoria no desempenho operacional (BMD e AMD). Em segundo lugar, testamos os dados de cada variável contextual de acordo com as tecnologias da Indústria 4.0 e os níveis de implementação de PE. Consideramos associações significativas com valores residuais ajustados maiores do que $|1.96|$ e $|2.58|$, correspondendo a um nível de significância de 0,05 e 0,01, respectivamente.

5 RESULTADOS

A Tabela 4 apresenta a tabela de contingência e os resultados do teste qui-quadrado para todas as combinações de níveis da implementação de práticas de PE e das tecnologias da Indústria 4.0, de acordo com o nível de melhoria de desempenho das empresas. Os valores residuais ajustados indicam que, para as empresas que não observaram níveis mais elevados de melhoria do desempenho operacional nos últimos três anos, nenhuma das associações entre a Indústria 4.0 e PE são significativas. Contrariamente à expectativa convencional, apesar da existência de empresas que afirmam estar amplamente implementando práticas da PE e/ou tecnologias de Indústria 4.0, nenhuma delas percebeu uma melhoria do desempenho operacional relevante. Uma explicação disso baseia-se nos argumentos apresentados pelo Liker e Rother (2011) e Longoni et al. (2013), que afirmam que qualquer abordagem de melhoria, independentemente de seus métodos, quando mal implementados ou inutilizados podem ter seus benefícios reduzidos, causando até efeitos contrários aos esperados.



Por outro lado, para empresas AMD, os resultados mostram uma associação significativa (p -valor $< 0,01$) entre as tecnologias da Indústria 4.0 e práticas de PE. Na verdade, os resultados sugerem que as empresas que estão implementando amplamente as práticas PE são mais suscetíveis a adotar as tecnologias da Indústria 4.0, e seu desempenho operacional parece ser positivamente impactado por essa associação. Surpreendentemente, as empresas que estão fracamente implementando tanto PE e Indústria 4.0 também observaram um alto nível de melhoria de desempenho nos últimos anos. Este resultado pode ser justificado devido ao contexto sócio-econômico em que estas empresas estão inseridas. Nos mercados emergentes, como o Brasil, a instabilidade econômica tende a ter repercussões nas variações cambiais, o que pode afetar significativamente o desempenho operacional de uma empresa, dependendo do perfil de negócios (WONG et al., 2011). Assim, esta conclusão sugere que, apesar dos esforços em abordagens de melhoria, como PE e Indústria 4.0, as empresas dentro deste contexto devem levar em conta outros aspectos sócio-econômicos para apoiar a sua estratégia de negócio.

Tabela 4

Teste qui-quadrado entre os níveis de tecnologias da Indústria 4.0 e implementação de PE de acordo com a melhoria do desempenho operacional

Melhoria do desempenho operacional	Tecnologias da Indústria 4.0	BPE		APE		Frequência total
		Frequência	Ajuste residual	Frequência	Ajuste residual	
BMD	BTC	16	-1.01	2	1.01	18
	ATC	2	1.01	1	-1.01	3
	Frequência total	18		3		21
AMD	BTC	12	2.88**	9	-2.88**	21
	ATC	1	-2.88**	12	2.88**	13
	Frequência total	13		21		34

* Significativo em 5%; ** significativo em 1%

A Tabela 5 exibe os resultados para testes qui-quadrado entre os níveis de implementação da indústria 4.0 e PE de acordo com o tamanho das empresas. Os resultados demonstraram que a associação entre a Indústria 4.0 e a PE é significativa independentemente do tamanho das empresas, sugerindo que o tamanho não deve ser visto como um impedimento. Além disso, as frequências de pequenas e grandes empresas que estão implementando PE e indústria 4.0 de maneira fraca é maior do que as outras combinações. Segundo Saurin e Ferreira (2009) e Tortorella et al. (2015), a implementação de PE no Brasil ainda é rara e focada principalmente



em estudos de caso com algumas empresas selecionadas. Ao considerar a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 no contexto brasileiro, essa lacuna é ainda maior, segundo Anderl (2014) e Confederação Nacional da Indústria Brasileira (2016).

Tabela 5

Teste do qui-quadrado entre os níveis de tecnologias da Indústria 4.0 e implementação de PE de acordo com o tamanho das empresas

Tamanho da empresa	Tecnologias da Indústria 4.0	BPE		APE		Frequência total
		Frequência	Ajuste residual	Frequência	Ajuste residual	
Pequena e média	BTC	10	2.21*	3	-2.21*	13
	ATC	1	-2.21*	4	2.21*	5
	Frequência total	11		7		18
Grande	BTC	18	2.84**	8	-2.84**	26
	ATC	2	-2.84**	9	2.84**	11
	Frequência total	20		17		37

* significativo em 5%; ** significativo em 1%

Finalmente, em relação à variável contextual "Tempo de implementação de PE" a Tabela 6 mostra os resultados da tabela de contingência com valores de teste qui-quadrado. Para empresas que estão em fase de implementação da PE por menos de 2 anos, os resultados não indicam uma associação significativa entre a indústria 4.0 e a PE. Uma vez que a PE é uma abordagem precursora e essas empresas não tem muita experiência sobre ela, é razoável que nenhuma associação tenha sido encontrada com as tecnologias da Indústria 4.0, que é uma abordagem mais recente. No entanto, com as empresas que tem se tornado mais experientes na implementação de PE (> 2 anos), os resultados mostram uma associação significativa com a Indústria 4.0. As empresas experientes que afirmam estar fortemente adotando tecnologias da Indústria 4.0 são as que implementam práticas da PE mais extensivamente. Por sua vez, apesar de sua experiência, parece que a frequência das empresas que tem dificuldade em implementar as práticas da PE é muito maior quando a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 também é fraca. Portanto, nossos resultados convergem para estudos anteriores (HINES et al., 2004; JASTI e KODALI, 2015) e suportam que a experiência da empresa na implementação de PE é uma variável importante a ser considerada ao associar as práticas de PE a outras abordagens de melhoria, como a Indústria 4.0.



Tabela 6

Teste do qui-quadrado entre os níveis de tecnologias da Indústria 4.0 e implementação de LP de acordo com o tempo de implementação da PE nas empresas (anos)

Tempo de implementação da PE	Tecnologias da Indústria 4.0	BPE		APE		Frequência total
		Frequência	Ajuste residual	Frequência	Ajuste residual	
≤ 2 anos	BTC	10	1.33	2	-1.33	12
	ATC	2	-1.33	2	1.33	4
	Frequência total	12		4		16
> 2 anos	BTC	18	3.36**	9	-3.36**	27
	ATC	1	-3.36**	11	3.36**	12
	Frequência total	19		20		39

* significativo em 5%; ** significativo em 1%

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Contribuição teórica

Esta pesquisa propõe uma nova abordagem para identificar como a integração de tecnologias da Indústria 4.0 nas práticas de gestão atual, como as de PE, corrobora com a melhoria do desempenho operacional. A literatura sobre PE que aborda seu relacionamento com as tecnologias da quarta revolução é escassa, e superficialmente sugere uma associação positiva, sem validação empírica. Além disso, estudos prévios (SANDERS et al., 2016; KOLBERG et al., 2016) focaram em empresas localizadas em países de alto desenvolvimento, desconsiderando os desafios socioeconômicos que as empresas de países de economia emergentes podem enfrentar.

Nossa abordagem identifica como a associação de PE e Indústria 4.0 de acordo com diferentes variáveis contextuais pode contribuir para melhorar o desempenho operacional em economias emergentes. Para isso, analisamos a amostra de dados agrupando-os de acordo com o nível de implementação das práticas de PE e das tecnologias da Indústria 4.0, e de acordo com o nível de melhoria dos indicadores operacionais de desempenho nos últimos anos. Usando a nossa proposta de análise, os pesquisadores podem identificar o contexto com a maior probabilidade de favorecer a implementação de práticas PE e de tecnologias da Indústria 4.0.

Fornecemos, também, uma compreensão mais aprofundada sobre como a Indústria 4.0 pode apoiar a implementação de práticas PE, permitindo que as empresas melhorem o gerenciamento desses processos de mudança. Além disso, mostramos que as variáveis



contextuais das empresas estão associadas à adoção da Indústria 4.0 e PE, indicando que a relação esperada entre a implementação de ambas as abordagens pode não ser tão generalizada como sugerido na literatura existente.

6.2 Implicação prática

Os resultados mostraram que a frequência de empresas de ambos tamanhos que afirmam mal ter executado a implementação de PE e indústria 4.0 é maior. Por outro lado, a maioria das empresas (independente do seu tamanho) que têm um nível de adoção mais elevado das tecnologias da Indústria 4.0 também afirmam ter um nível de implementação mais elevado de PE, indicando que o tamanho pode não ser uma barreira para uma implementação simultânea. Além disso, os resultados sugerem que as empresas que implementam amplamente as práticas PE podem ser mais propensas a adotar as tecnologias de Indústria 4.0.

Com o advento da Indústria 4.0, a aplicabilidade da PE adquirirá uma importância especial. Seus princípios e práticas tendem a se tornar mais relevantes enquanto a nova revolução industrial torna possível compreender melhor a estrutura da demanda dos clientes e acelerar o processo de intercâmbio de dados e informações em toda a cadeia de valor. Além disso, a Indústria 4.0 pode mudar a natureza da PE, levando as empresas a níveis superiores de excelência. Assim, a identificação de uma associação positiva entre a implementação de ambas as abordagens fornece aos gestores e aos profissionais argumentos para aprimorar seus processos de negócios e lapidar suas culturas organizacionais de acordo com princípios e práticas da PE, ao mesmo tempo que introduzem tecnologias de CPS e TIC de forma colaborativa.

6.3 Limitações e pesquisas futuras

Nosso estudo apresenta algumas limitações que estão associadas à natureza da amostra utilizada na pesquisa. Em primeiro lugar, os entrevistados eram de empresas localizadas no Brasil; suas respostas podem ser influenciadas por questões locais. Em segundo lugar, a nossa amostra de entrevistados não era probabilística, e os nossos resultados são apenas generalizados às populações com as mesmas características.

De acordo com Lasi et al. (2014), 'Indústrias 4.0' autênticas são as que aplicam CPS e TIC extensivamente em todo o fluxo de valor, e tanto o seu desempenho operacional e relevância sócio-econômica são impactados positivamente e fortalecidos. A identificação dessas empresas e sua classificação de maturidade foram além do escopo deste estudo, sendo visto como um tópico promissor de pesquisa futuro.



No que se refere ao objetivo proposto, esta investigação verificou empiricamente a associação entre a implementação de PE e a Indústria 4.0 para melhorar o desempenho operacional. Devido à pouca evidência na literatura sobre a probabilidade de qualquer influência interdependente, uma amostragem maior de empresas seria necessária para estabelecer uma perspectiva mais geral sobre o problema. Essa extensão exigiria uma coleta e análise de dados mais elaborada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderl, R. (2014). *Indústria 4.0: advanced engineering of smart products and smart production*. Proceedings of International Seminar on High Technology, 19, Piracicaba, Brazil.
- Armstrong, J. & Overton, S. (1977). Estimating nonresponse bias in mail surveys. *Journal of Marketing Research*, 14(3), 396-402.
- Confederação Nacional da Indústria Brasileira (2016). *Industry 4.0: a new challenge for Brazilian industry*. CNI Indicators, 17(2).
- Dworschak, B. & Zaiser, H. (2014). Competences for cyber-physical systems in manufacturing – first findings and scenarios. *Procedia CIRP*, 25, 3-8.
- Erol, S., Schumacher, A. & Sihni, W. (2016). Strategic guidance towards Industry 4.0—a three-stage process model. Proceedings of International Conference on Competitive Manufacturing (COMA16), Stellenbosch, South Africa.
- Ganzarain, J. & Errasti, N. (2016). Three stage maturity model in SME's towards Industry 4.0. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(5), 1119-1128.
- Gjeldum, N., Mladineo, M. & Veza, I. (2016). Transfer of model of innovative smart factory to Croatian economy using lean learning factory. *Procedia CIRP*, 54, 158-163.
- Hair, J., Tatham, R., Anderson, R. & Black, W. (2006). *Multivariate data analysis*, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Herron, C. & Braiden, P. (2006). A methodology for developing sustainable quantifiable productivity improvement in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 104, 143-153.
- Hines, P., Holweg, M. & Rich, N. (2004). Learning to evolve: a literature review of contemporary lean thinking. *International Journal of Operations and Production Management*, 24(10), 994-1011.
- Jasti, N. & Kodali, R. (2015). Lean production: literature review and trends. *International Journal of Production Research*, 53(3), 867-885.
- Jasti, N. & Kodali, R. (2016). An empirical study for implementation of lean principles in Indian manufacturing industry, *Benchmarking: An International Journal*, 23(1), 183-207.



- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A. & Wahlster, W. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: securing the future of German manufacturing industry. final report of the Industrie 4.0 Working Group, Forschungsunion.
- Kolberg, D., Knobloch, J. & Zühlke, D. (2016). Towards a lean automation interface for workstations. *International Journal of Production Research*, forthcoming, 1-12.
- Kolberg, D. & Zühlke, D. (2015). Lean automation enabled by Industry 4.0 technologies. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1870-1875.
- Kull, T., Yan, T., Liu, Z. & Wacker, J. (2014). The moderation of lean manufacturing effectiveness by dimensions of national culture: testing practice-culture congruence hypotheses. *International Journal of Production Economics*, 153, 1-12.
- Landscheidt, S. & Kans, M. (2016). Automation practices in Wood product industries: lessons learned, current practices and future perspectives. *Proceedings of the 7th Swedish Production Symposium SPS*, 25-27 October, Lund-Sweden.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H., Feld, T. & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0”, *Business & Information Systems Engineering*, 6, 239-242.
- Lee, J., Bagheri, B. & Kao, H. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems”, *Manufacturing Letters*, 3, 18-23.
- Liker, J. (2004). *The Toyota Way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*. McGraw Hill Professional.
- Liker, J. & Rother, M. (2011). Why lean programs fail”, Knowledge Center of Lean Enterprise Institute, Disponível em: <<http://www.lean.org/common/display>>. Acesso em: 13 de maio de 2017.
- Longoni, A., Pagell, M., Johnston, D. & Veltri, A. (2013). When does lean hurt?—an exploration of lean practices and worker health and safety outcomes”, *International Journal of Production Research*, 51(11), 3300-3320.
- Mann, D. (2005). *Creating a lean culture: tools to sustain lean conversion*, Productivity Press, New York.
- Marodin, G. & Saurin, T. (2013). “Implementing lean production systems: research areas and opportunities for future studies”, *International Journal of Production Research*, 51(22), 6663-6680.
- Meyers, L., Gamst, G. & Guarino, A. (2006). *Applied Multivariate Research*, Sage Publications, Thousand Oaks.
- Netland, T. & Ferdows, K. (2014). What to expect from a corporate lean program”, *MIT Sloan Management Review*, 55(3), 83-89.
- Qin, J., Liu, Y. & Grosvenor, R. (2016). A categorical framework of manufacturing for Industry 4.0 and beyond”, *Procedia CIRP*, 52, 173-178.



- Rencher, A. (2002). *Methods of multivariate analysis*, Wiley-Interscience, New Jersey.
- 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), 811-833.
- Saurin, T. & Ferreira, C. (2009). “The impacts of lean production on working conditions: A case study of a harvester assembly line in Brazil”, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(2), 403-412.
- 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.
- Shah, R. & Ward, P. (2003). “Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance”, *Journal of Operations Management*, 21(2), 129-149.
- Shah, R. & Ward, P. (2007). “Defining and developing measures of lean production”, *Journal of Operations Management*, 25(4), 785-805.
- Sibatrova, S. & Vishnevskiy, K. (2016). Present and future of the production: integrating lean management into corporate foresight.
- Spear, S. (2009). *Chasing the Rabbit: how market leaders outdistance the competition and how great companies can catch up and win*, McGraw Hill, New York, NY.
- Tabachnick, B. & Fidell, L. (2013). *Using multivariate statistics*, Pearson, Upper Saddle River, NJ.
- Tortorella, G., Marodin, G., Miorando, R. & Seidel, A. (2015). The impact of contextual variables on learning organization in firms that are implementing lean: a study in Southern Brazil. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(9-12), 1879-1892.
- Womack, J., Jones, D. & Roos, D. (2007). *The machine that changed the world: the story of lean production - Toyota’s secret weapon in the global car wars that is revolutionizing world industry*, 1st ed., New York, NY, Free Press.
- Wong, C., Boon-Itt, S. & Wong, C. (2011). The contingency effects of environmental uncertainty on the relationship between supply chain integration and operational performance. *Journal of Operations Management*, 29(6), 604-615.

Originais recebidos em: 21/08/2017.

Aceito para publicação em: 22/02/2018