



(INTERAÇÃO ENTRE AS PRÁTICAS LEAN SEIS SIGMA E AS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0: UM ESTUDO DE CASO EM UMA FÁBRICA DE CAMINHÕES)

Contribuições da Engenharia de Produção para a Gestão de Operações Energéticas Sustentáveis

Juliano Endrigo Sordan (UFSCar)
julianosordan@yahoo.com.br

Pedro Carlos Oprime (UFSCar)
pedro@dep.ufscar.br

Márcio Lopes Pimenta (UFU)
pimenta@ufu.br

Clésio Aparecido Marinho (UFSCar)
clesio.marinho@yahoo.com.br

No âmbito das estratégias de melhoria, o paradigma da Indústria 4.0 emerge como uma possibilidade de integração entre as novas tecnologias digitais e a abordagem Lean Seis Sigma. No entanto, após uma década de discussão sobre as tendências inerentes à manufatura digital, estudos empíricos a respeito desse tema ainda representam uma lacuna no campo da gestão da produção e da excelência operacional. O presente artigo tem como objetivo apresentar um estudo de caso, caracterizando os pontos de contato entre as práticas Lean Seis Sigma e as tecnologias da Indústria 4.0 implementadas em uma fábrica de caminhões, assim como os requisitos técnicos necessários e os resultados obtidos a partir dessa implementação. A análise dos dados coletados por meio de entrevistas, observações in loco e documentos institucionais evidenciam a aderência das práticas da organização com os elementos estruturados em um modelo de análise fundamentado na literatura. A caracterização da estratégia de integração entre as práticas LSS e as tecnologias da Indústria 4.0 no caso apresentado poderá fornecer insights em direção a novos projetos de excelência operacional no contexto da manufatura digital.

Palavras-chave: Lean Seis Sigma, Indústria 4.0, Manufatura Digital, Excelência Operacional.

1. Introdução

A abordagem Lean Seis Sigma (LSS) tem sido reconhecida pelas comunidades acadêmica e empresarial como uma importante estratégia de excelência operacional, capaz de gerar resultados em termos de qualidade, custo e velocidade. Recentemente, o paradigma da quarta revolução industrial, também conhecido como "Indústria 4.0" (I4.0), tornou-se parte das estratégias de manufatura rumo à implementação de sistemas *Ciber-Físicos* (*Cyber-Physical Systems* - CPS) e fábricas inteligentes (*Smart Factories*).

A implementação de tecnologias digitais no chão de fábrica tem mudado consideravelmente o *modus operandi* dos processos de fabricação. As Tecnologias da Informação (TI) estão transformando produtos em sistemas complexos que combinam *hardware*, *software*, sensores, microprocessadores, banco de dados e conectividade, fazendo com que as empresas revejam maneira como elas fazem tudo internamente para enfrentar o novo cenário competitivo (PORTER; HEPPELMANN, 2014). No âmbito das práticas de excelência operacional, espera-se que a integração das tecnologias I4.0 seja capaz de otimizar a coleta e a análise de dados dos processos de fabricação com alta precisão e velocidade, aumentando as possibilidades de melhoria do desempenho dos negócios (AGARWAL; BREM, 2015).

Neste contexto, a quarta revolução industrial tem criando novas oportunidades e desafios para as iniciativas de melhoria contínua, permitindo o uso das tecnologias I4.0, como a Internet Industrial das Coisas (IIoT), identificação por radiofrequência (RFID), *Big Data Analytics*, realidade aumentada, entre outras (SCHWAB, 2017). Diante dessas considerações, acredita-se que a interação entre as tecnologias digitais e as práticas LSS possa ampliar o escopo das ações de melhoria nas organizações industriais. Assim, três questões de pesquisa emergem nesse contexto: *QP01 - Quais são os pontos de contato (PCs) entre as práticas LSS e as tecnologias I4.0?* *QP02 - Como é possível implementar esses PCs?* e *QP03 - Quais são os resultados dessa interação?*

Este artigo tem como objetivo apresentar um estudo empírico que permita responder as questões de pesquisa apresentadas. Para alcançar esse objetivo, uma estrutura de análise de pesquisa foi construída com base no estado da arte sobre o tema. Tal estrutura foi utilizada como guia na condução de um estudo de caso único e longitudinal, realizado em uma fábrica de caminhões instalada no Brasil, cujo processo de conversão digital encontra-se em estágio avançado de implementação.

2. Referencial Teórico

A quarta revolução industrial surgiu na virada do século XXI, impulsionada principalmente pelos avanços da internet móvel, miniaturização e barateamento de sensores e progresso no campo da inteligência artificial e aprendizado de máquina (SCHWAB, 2017). No entanto, o termo "Indústria 4.0" tornou-se reconhecido mundialmente após um evento realizado na Alemanha em 2011 (Feira de Hannover) para estimular os negócios em torno das *Smart Factories* e promover soluções digitais para o implementação de CPS (KAGERMANN *et al.*, 2013; SANDERS *et al.*, 2016).

Para Lasi *et al.*, (2014), a I4.0 descreve um projeto futuro de manufatura, concebido para se adequar à diversas transformações sociais, políticas, econômicas e tecnológicas, tais como necessidade de redução do tempo de desenvolvimento de produtos, aumento da demanda por produtos individuais, flexibilidade da produção, descentralização na tomada de decisão, digitalização dos processos industriais, integração entre os componentes físicos e digitais, entre outros.

A Fábrica Inteligente pode ser compreendida como “*uma aplicação intensiva de dados de tecnologia da informação no nível da fábrica e acima para permitir operações inteligentes, eficientes e responsivas*” (WALLACE; RIDDICK, 2013). De acordo com o relatório "*Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries*", publicado pelo Boston Consulting Group, um conjunto de nove tecnologias associadas à I4.0 transformará o ambiente de manufatura nos próximos anos. São elas: (1) *Big Data Analytics*; (2) robótica autônoma; (3) simulação; (4) integração de sistemas horizontais e verticais; (5) Internet Industrial das Coisas - IIoT; (6) segurança cibernética; (7) computação em nuvem; (8) manufatura aditiva; e (9) realidade aumentada (RÜßMANN *et al.*, 2015).

Partindo do princípio de que a conversão para o modelo digital de manufatura requer arquiteturas específicas de automação e tecnologia da informação, torna-se necessário compreender “como” a junção entre os mundos físico e virtual pode ser operacionalizada em um sistema integrado. Diversos autores fazem referência ao clássico modelo de pirâmide de automação estruturada a partir de níveis hierárquicos que se inicia pela conexão dos sensores, até chegar no nível de controle empresarial (BARTODZIEJ, 2016; GILCHRIST, 2016; MARQUES *et al.*, 2017).

A literatura sobre a I4.0 também apresenta estudos norteados para o preenchimento de lacunas de competências que surgiram frente ao novo paradigma industrial. Como exemplo, o termo “*Operator 4.0*” pode ser usado para descrever um operador inteligente e habilidoso que realiza não apenas o trabalho cooperativo com robôs, mas também o trabalho auxiliado por máquinas, CPS, Interface Homem-Máquina (IHM) e automação adaptativa (ROMERO *et al.*, 2016).

Sendo assim, a implementação de todas essas tecnologias em um modelo sistematizado de manufatura digital também pode ser caracterizada por meio dos CPS para permitir a conexão eficiente entre máquinas, robôs, sensores, pessoas, produtos, veículos de transporte e computadores (KAGERMANN *et al.*, 2013; MARQUES *et al.*, 2017). Portanto, a fábrica 4.0 deve lidar com as complexidades do ambiente de produção usando estruturas descentralizadas de comunicação e informação, com as seguintes especificidades (LUCKE *et al.*, 2008):

- Reconhecimento de objetos através de *tags*, sensores e leitores.
- Sistemas de posicionamento e reconhecimento de local para reduzir o tempo ocioso.
- Monitoramento de máquinas e processos em tempo real.
- Sistemas embarcados com baixo consumo de energia integrados a dispositivos móveis.
- Redes de comunicação sem fio entre tecnologias e objetos de fabricação.
- Identificação automática de objetos como código de barras e dispositivos RFID.
- Sistemas para conectar diferentes sensores e atuadores no chão de fábrica.

O ponto central da análise da interação entre as práticas LSS e as tecnologias I4.0 é a investigação sobre os PCs implementados nos processos de manufatura para apoiar as estratégias de excelência operacional na organização. Para isso, torna-se necessário compreender o estado da arte a respeito dos estudos desenvolvidos nessa área de pesquisa que fornecem exemplos de implementação das tecnologias habitadoras da I4.0 no contexto da melhoria contínua. O Quadro 1 apresenta uma síntese dos principais estudos desenvolvidos sobre o tema nos últimos anos. Ao todo, foram identificados treze pontos de contato entre as práticas LSS e as tecnologias I4.0. Tais contribuições serviram de referência para a construção da estrutura conceitual-teórica utilizada para nortear o estudo de caso.

Quadro 1 – Estudos sobre a integração entre as práticas LSS e as tecnologias I4.0

Pontos de Contato entre as práticas LSS e as tecnologias I4.0	Autor(es)
PC01.Mapeamento de processos e do Fluxo de Valor auxiliado por CPS, RFID, GPS, <i>Big Data Analytics</i> e Simulação.	Tamás <i>et al.</i> , (2016); Lugert <i>et al.</i> , (2018); Mayr <i>et al.</i> , (2018)
PC02.Medição e análise do desempenho do processo de forma automatizada por meio de CPS, <i>Big Data Analytics</i> e M2M.	Hoerl <i>et al.</i> , (2014); Ante <i>et al.</i> , (2018)
PC03.Desdobramento da Função Qualidade (QFD) auxiliado por <i>Smart Products</i> e/ou <i>Big Data Analytics</i> .	Li <i>et al.</i> , (2015); Sanders <i>et al.</i> , (2016)
PC04.Estudos de capacidade e CEP em tempo real usando robótica avançada ou CPS.	Powell <i>et al.</i> , (2018)
PC05.Monitoramento das condições de máquinas e equipamentos usando sensores, RFID, CPS, <i>Big Data Analytics</i> e simulação.	Li <i>et al.</i> , (2015); Sanders <i>et al.</i> , (2016); Wagner <i>et al.</i> , (2017); Mayr <i>et al.</i> , (2018)
PC06.Otimização do sistema de abastecimento e movimentação de materiais por meio de Simulação, AGVs e RFID.	Sanders <i>et al.</i> , (2016)
PC07.Inclusão de robótica e CPS em projetos de células de manufatura e fluxo contínuo (<i>chaku-chaku system</i>).	Kolberg e Zühlke (2015); Sanders <i>et al.</i> , (2016)
PC08.Uso de soluções modulares do tipo “ <i>Plug'n'Play</i> ” e <i>Machine Learning</i> para reduzir tempo de <i>setup</i> .	Kolberg e Zühlke (2015); Sanders <i>et al.</i> , (2016)
PC09.Substituição dos <i>kanbans</i> físicos por controles digitais (<i>e-kanban system</i>) usando CPS, sensores, atuadores, e RFID para promover a produção puxada.	Kolberg e Zühlke (2015); Sanders <i>et al.</i> , (2016); Mrugalska e Wyrwicka (2017); Wagner <i>et al.</i> , (2017); Ante <i>et al.</i> , (2018)
PC10.Controle da produção e visualização do status das operações de manufatura em tempo real por meio de CPS, IIoT, sistema MES e RFID.	Li <i>et al.</i> , (2015); Kolberg <i>et al.</i> , 2017; Ma <i>et al.</i> , (2017); Romero <i>et al.</i> (2018)
PC11.Emprego de robótica autônoma ou colaborativa nas atividades de controle da qualidade (<i>Smart Quality</i>).	Hedelind e Jackson (2011)
PC12.Uso de sensores, atuadores, RFID, Inteligência Artificial e Realidade Aumentada como soluções <i>mistake proofing</i> .	Hedelind e Jackson (2011); Ma <i>et al.</i> , (2017); Mrugalska e Wyrwicka (2017)
PC13.Emprego de Realidade Aumentada e <i>e-learning</i> para instruir operadores na execução de uma determinada tarefa.	Kolberg e Zühlke (2015); Sanders <i>et al.</i> , (2016); Powell <i>et al.</i> , (2018)

Fonte: Elaborado pelos autores

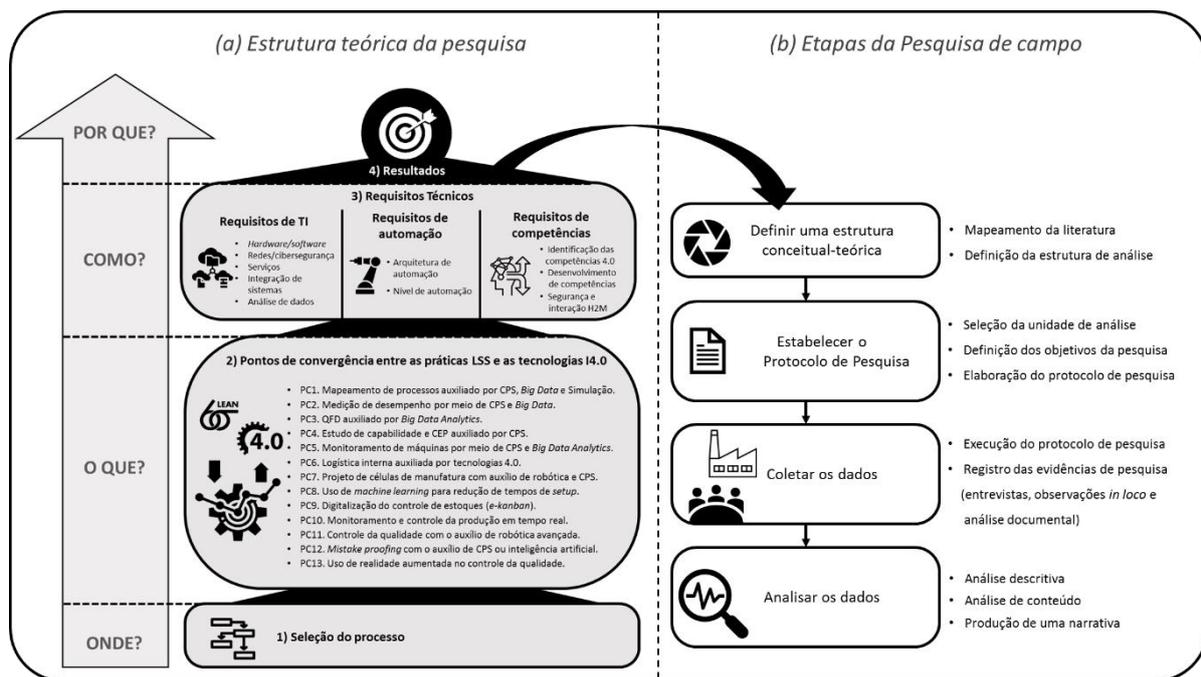
3. Método de pesquisa

Para alcançar o objetivo desta pesquisa, o método escolhido foi o estudo de caso único e longitudinal, direcionado para a compreensão da dinâmica de interação entre as práticas LSS e as tecnologias I4.0 em uma organização com experiência no processo de conversão digital. O estudo de caso é recomendado para trabalhos que tenham como características a necessidade de encontrar respostas às questões “como” e “por que”, pouco ou nenhum controle sobre o evento por parte do pesquisador e foco em problemas contemporâneos dentro de um contexto real (YIN, 2009). O estudo de caso, por ser de caráter empírico, por investigar um dado fenômeno dentro de um contexto real contemporâneo por meio de uma análise aprofundada que possibilita o conhecimento detalhado sobre o fenômeno estudado (MIGUEL, 2012).

A Figura 1 ilustra o planejamento do estudo de campo a partir de uma estrutura teórica (Figura 1a), construída com base na literatura mapeada e sintetizada na seção anterior. Tal estrutura

permite priorizar um processo em particular (Onde), estabelecer os elementos de análise que incluem os PCs (O que) e os requisitos técnicos (Como), bem como os resultados dessa interação (Por que). As etapas de execução da pesquisa de campo (Figura 1b) incluíram a definição de um protocolo de pesquisa de estudo de caso para estruturar os procedimentos de coleta e análise dos dados.

Figura 1 – Planejamento da pesquisa



Fonte: Elaborado pelos autores

A empresa analisada, denominada neste artigo como “Alpha S.A.”, ocupa a primeira posição no *ranking* de produção de caminhões e ônibus da América Latina e atua no Brasil desde 1956. Emprega atualmente mais de 14 mil colaboradores e produz veículos comerciais nas linhas caminhão, ônibus, *sprinter* e agregados. O estudo foi desenvolvido em uma unidade industrial localizada no Estado de São Paulo, com foco na linha de montagem de caminhões, que representa o processo mais avançado de conversão para o modelo I4.0 na organização.

O procedimento de coleta de dados foi conduzido no período de maio a dezembro de 2019 a partir de entrevistas, visitas *in loco* e análise de documentos institucionais. Ao todo, foram entrevistados 14 colaboradores que participaram de projetos relacionados à I4.0 e com proficiência nas práticas LSS da organização. Os dados foram analisados por meio de técnicas de estatística descritiva e análise de conteúdo, de modo a permitir a construção de uma narrativa sobre as práticas investigadas.

4. Resultados

Por meio de um sistema integrado que abrange vários métodos e ferramentas LSS, tais como projetos desenvolvidos por especialistas e ações *kaizen*, a Alpha S.A. implementa sua estratégia de excelência operacional nas diferentes unidades fabris espalhadas pelos cinco continentes. Em 2019 a organização iniciou uma estratégia de conversão I4.0 por meio de um modelo de implementação de projetos estruturado em dez pilares: manufatura aditiva, IIoT, computação em nuvem, integração de sistemas, realidade aumentada, *Big Data Analytics*, cibersegurança, robótica colaborativa, simulações e pessoas. De acordo com documentos internos da empresa, o projeto de digitalização da fábrica de caminhões poderá gerar ganhos de 15% de eficiência e 20% em logística.

Para obter a percepção individual dos entrevistados quanto à implementação dos PCs na Alpha S.A., foi aplicado um questionário com doze questões fechadas (escala de 5 pontos). Considerando que essas questões são de natureza categóricas, o critério adotado para a relevância das respostas foi o Índice de Respostas Favoráveis (IRF), que representa a soma das frequências nos itens (4) “concordo” e (5) “concordo totalmente”. O Quadro 2 mostra a distribuição na frequência das respostas obtidas nas entrevistas e destaca os PCs mais significativos. O coeficiente Alpha de Cronbach para esse questionário foi 0,8024, o que demonstra a confiabilidade nas respostas obtidas, visto que o valor aceitável para esse coeficiente deve ser acima de 0,70.

Uma vez evidenciado os PCs com maior aderência no processo de montagem dos caminhões, segundo as percepções dos entrevistados, a pesquisa foi direcionada para a estratégia de implementação desses PCs, buscando um entendimento sobre os requisitos técnicos necessários, assim como os resultados decorrentes dessa estratégia. A seguir, apresenta-se uma narrativa sobre as práticas evidenciadas na Alpha S.A. a respeito dos elementos caracterizados na estrutura de análise da pesquisa.

De acordo com a explicação de um assistente executivo, o **mapeamento dos processos auxiliado por CPS e Big Data Analytics (PC1)** pode ser implementado por meio das tecnologias AGVs (*Automated guided vehicles*) e AIVs (*Automated intelligent vehicles*) que geram uma grande quantidade de dados possibilitando a identificação de gargalos e a integração da Teoria das Restrições com o LSS (*Theory of Constraints Lean Six Sigma – TLS*). Além disso, os dados gerados pelos AGVs e AIVs podem ser utilizados *a posteriori* para simulação e otimização do processo.

Quadro 2 – Percepção dos entrevistados quanto à implementação dos PCs na Alpha S.A.

Questões	1	2	3	4	5	Índice de Respostas Favoráveis (IRF)
	Discordo Totalmente	Discordo	Nem discordo, nem concordo	Concordo	Concordo Totalmente	
Frequência das Respostas (%)						
PC1. Mapeamento de processos auxiliado por CPS, <i>Big Data</i> e Simulação.	0,00	0,00	35,71	42,86	21,43	64,29
PC2. Medição de desempenho por meio de CPS e <i>Big Data</i> .	0,00	0,00	0,00	57,14	42,86	100,00
PC3. QFD auxiliado por <i>Big Data Analytics</i> .	0,00	7,14	71,43	14,29	7,14	21,43
PC4. Estudo de capacidade e CEP auxiliado por CPS.	0,00	0,00	35,71	42,86	21,43	64,29
PC5. Monitoramento de máquinas por meio de CPS e <i>Big Data Analytics</i> .	0,00	14,29	21,43	57,14	7,14	64,28
PC6. Logística interna auxiliada por tecnologias 4.0.	0,00	0,00	14,29	35,71	50,00	85,71
PC7. Projeto de células de manufatura com auxílio de robótica e CPS.	7,14	14,29	21,43	42,86	14,29	57,15
PC8. Uso de <i>Data Science</i> para a redução de tempos de <i>setup</i> .	0,00	0,00	71,43	21,43	7,14	28,57
PC9. Digitalização do controle de estoques (<i>e-kanban</i>).	0,00	0,00	0,00	57,14	42,86	100,00
PC10. Monitoramento e controle da produção em tempo real.	0,00	0,00	7,14	42,86	50,00	92,86
PC11. Controle da qualidade com o auxílio de robótica avançada.	0,00	35,71	21,43	21,43	21,43	42,86
PC12. <i>Mistake proofing</i> com o auxílio de CPS ou inteligência artificial.	0,00	0,00	21,43	42,86	35,71	78,57
PC13. Uso de realidade aumentada para otimizar atividades operacionais.	0,00	14,29	57,14	28,57	0,00	28,57

Fonte: Dados da pesquisa

A Medição de desempenho por meio de CPS e *Big Data* (PC2) encontra-se parcialmente implementada na Alpha S.A. Segundo o gerente de otimização de processos, os indicadores monitorados *on-time* abrangem apenas métricas relacionadas a qualidade, rastreabilidade e OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) em um setor específico da fábrica. Também parcialmente implementado, o Estudo de capacidade e CEP auxiliado por CPS (PC4) é executado por meio de um *software* específico que está conectado a um *Data Lake*. De acordo com o assistente executivo, o monitoramento estatístico em tempo real é capaz de gerar alertas quando a operação de uma máquina sai dos parâmetros de controle, permitindo que seja feita uma intervenção humana de forma mais direcionada.

O **Monitoramento de máquinas por meio de CPS e Big Data Analytics (PC5)** é executado na Alpha S.A. com o propósito de auxiliar a análise preditiva, incluindo análise de falhas, número de ciclos, tempo de vida útil e verificação das condições dos equipamentos. Na opinião de um gerente de manutenção, o *Big Data Analytics* permitirá o acesso às informações de forma mais rápida e precisa, proporcionando velocidade de reação quando ocorrer alguma anomalia. A **Logística interna auxiliada por CPS e AGV (PC6)** é uma prática consolidada na organização. Foram observados *in loco* dois exemplos pertinentes a este PC. O primeiro é o abastecimento das linhas de produção por meio de AGVs e AIVs. O segundo exemplo se refere ao armazenamento de itens com o auxílio de robôs e esteiras transportadoras automatizadas, onde o operador não tem nenhuma interferência no armazenamento das peças.

A implementação de robôs colaborativos (COBOTs) representa um dos pilares do modelo I4.0 na Alpha S.A. Assim, o **Projeto de células de manufatura com auxílio de robótica e CPS (PC7)** vem sendo implementado com a utilização de COBOTs nos postos de trabalho. Conforme declaração de uma colaboradora da área de planejamento, a programação de um COBOT pode ser feita de forma intuitiva, sem a necessidade de capacitação especializada, visto que os movimentos do braço mecânico são registrados e memorizados automaticamente. Durante a pesquisa, verificou-se que a organização estava conduzindo um estudo de aplicação de um COBOT para complementar o rendimento de um colaborador na linha de montagem.

De acordo com o planejador de logística da fábrica, o projeto de **Digitalização do controle de estoque (PC9)** foi implementado por meio de um dispositivo “*WiFi push button*”, onde o operador solicita os materiais a partir de um dispositivo eletrônico e a reposição é feita diretamente do almoxarifado para a linha de produção por meio de empilhadeiras equipadas com *tablets*. Outra solução empregada neste projeto foi a tecnologia “*pick by light*”, onde a separação dos materiais é auxiliada por luzes que sinalizam os locais de abastecimento nas estruturas de armazenagem, agilizando o processo e reduzindo erros na manipulação de itens.

O **Monitoramento e o controle da produção em tempo real (PC10)** na seção de montagem de cabines é executado por meio de um *Andon* digital. Conforme declarações de analistas de produção e do gerente de operações, as informações a respeito da operação com os AGVs e AIVs, ritmo e *status* da linha de montagem, registros de paradas, entre outras, são visualizadas em tempo real por meio de *smartphones* e telas *touch*, otimizando o tempo de resposta no processo.

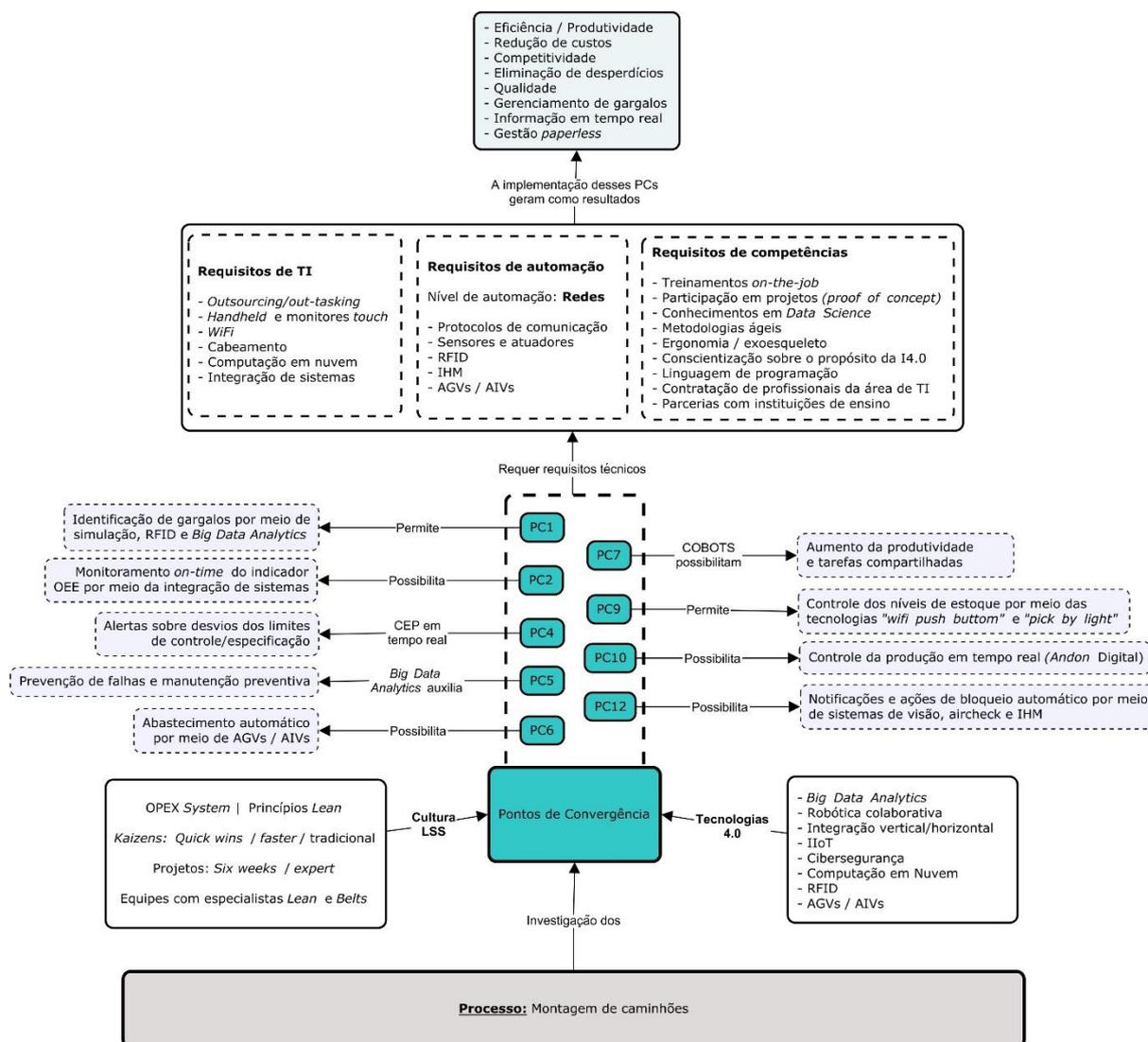
A implementação de *Mistake proofing com auxílio de CPS ou inteligência artificial (PC12)* foi outra iniciativa evidenciada na Alpha S.A. Na opinião de três entrevistados (gerente de qualidade, analista técnico de produção e assistente executivo), as práticas que mais se destacam neste PC incluem: Sistemas eletrônicos e pneumáticos de checagem, bloqueios automáticos em operações realizadas por operadores não habilitados; e sistemas de visão mecânica capazes de capturar imagens de partes do produto na linha de montagem por meio de câmeras e sensores para bloqueio automático de anomalias com base em algoritmos de inteligência artificial.

Segundo informações do gerente de manutenção e do analista executivo, os **Requisitos Técnicos** necessários para a implementação desses PCs resultaram em uma arquitetura de automação e TI com uma série de protocolos de comunicação capazes de conectar diversas tecnologias, incluindo dispositivos móveis (*handheld*), *software*, *hardware*, robôs, sensores e atuadores, cabeamento ponto-a-ponto, *wireless*, entre outros. Quanto ao nível de automação do processo de montagem de caminhões, 57,14% dos entrevistados compreendem que a planta se encontra no *nível de redes*, que permite a utilização do histórico de dados para prever problemas na fábrica. Por outro lado, 42,86% acreditam a planta se encontra no *nível de otimização*, onde algoritmos são usados para estabelecer relações de causa e efeito e fornecer recomendações para tomada de decisão sobre falhas potenciais.

Os requisitos de competências mais citados pelos analistas de treinamento incluem: conscientização sobre o propósito da I4.0, conhecimentos sobre *Data Science*, linguagem de programação e metodologias ágeis. Dentre as ações de treinamento informadas pelos entrevistados, destacam-se: *workshops* internos sobre os pilares I4.0 e aprendizado por meio de projetos “*proof of concept*” (5 citações); parcerias com instituições de ensino (3 citações); e contratação de profissionais de TI (2 citações).

De acordo com a estrutura teórica da pesquisa apresentada na Figura 1, todos os esforços em direção a implementação dos PCs têm como propósito alcançar os objetivos organizacionais que justifiquem a estratégia de conversão ao modelo digital. Neste sentido, os **resultados** mais expressivos declarados pelos entrevistados incluem: eficiência e produtividade (10 citações); redução de custos (5 citações); eliminação de desperdícios e informação em tempo real (4 citações); qualidade, padronização e gestão *paperless* (3 citações); gerenciamento de gargalos e segurança (2 citações); e velocidade (1 citação). A caracterização de todos os elementos da pesquisa (processo, PCs, requisitos técnicos e resultados) está sintetizada em um mapa conceitual ilustrado na Figura 2, em uma perspectiva *bottom-up*.

Figura 2 – Mapa conceitual da pesquisa



Fonte: Dados da pesquisa

5. Conclusão

Este artigo buscou apresentar um estudo empírico a respeito da estratégia de integração entre as práticas LSS e as tecnologias I4.0 em uma fábrica de caminhões. Partindo de uma estrutura de análise de pesquisa construída a partir do referencial teórico sobre o tema, um estudo de caso único e longitudinal foi executado com o propósito de encontrar evidências a respeito da implementação dos PCs, assim como dos requisitos técnicos necessários e os resultados alcançados com essa implementação.

A análise dos dados coletados por meio de entrevistas, observações *in loco* e análise documental destacou a implementação de nove PCs e evidenciou alguns requisitos de TI, automação industrial e competências, que foram gerenciados na estratégia de conversão digital da organização. Além disso, a pesquisa mostrou os principais resultados obtidos a partir da integração entre os dois temas analisados (práticas LSS e tecnologias I4.0). O presente artigo não tem a pretensão de generalizar os resultados a partir de um único estudo de caso. Contudo, a narrativa apresentada poderá gerar *insights* para os profissionais que atuam na área de excelência operacional.

REFERÊNCIAS

ADOLPHS, P.; BEDENBENDER, H.; DIRZUS, D.; EHLICH, M.; EPPLE, U.; HANKEL, M.; KOZIOLEK, H. **Reference architecture model industrie 4.0 (rami4.0)**. ZVEI and VDI, Status Report. Disponível em <<https://www.zvei.org>>. Acesso em: 02 jan. 2015.

AGARWAL, N.; BREM, A. Strategic business transformation through technology convergence: Implications from General Electric's industrial internet initiative. **International Journal of Technology Management**, v.2, n. 67, p. 196-214, 2015.

ANTE, G.; FACCHINI, F.; MOSSA, G.; DIGIESI, S. Developing a key performance indicators tree for lean and smart production systems. **IFAC-PapersOnLine**, v.51, n. 11, p. 13-18, 2018.

BARTODZIEJ, C.J. **The Concept Industry 4.0: An Empirical Analysis of Technologies and Applications in Production Logistics**. Springer, 2016.

BRETTEL, M.; FRIEDERICHSEN, N.; KELLER, M; ROSENBERG, N. How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. **International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering**, v. 8, n. 1, p. 37-44, 2014.

CHEN, T.; LIN, Y. C. Feasibility evaluation and optimization of a smart manufacturing system based on 3d printing: a review. **International Journal of Intelligent Systems**, v. 32, n.4, p. 394-413, 2017.

GILCHRIST, A. **Introducing Industry 4.0**. In: Industry 4.0. Apress, Berkeley, CA, p. 195-215, 2016.

HEDELIND, M.; JACKSON, M. How to improve the use of industrial robots in lean manufacturing systems. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 22, n.7, p. 891-905, 2011.

HOERL, R.W.; SNEE, R.D.; DE VEAUX, R.D. Applying statistical thinking to ‘Big Data’ problems. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics**, v. 6, n. 4, p. 222-232, 2014.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **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, 2013. Disponível em < <https://www.acatech.de>>. Acesso em 25 out. 2018.

KOLBERG, D.; ZÜHLKE, D. Lean automation enabled by industry 4.0 technologies. **IFAC-PapersOnLine**, v. 48, n. 3, p. 1870-1875, 2015.

KOLBERG, D.; DNOBLOCH, J.; ZÜHLKE, D. Towards a lean automation interface for workstations. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 10, p. 2845-2856, 2017.

LASI, H.; FETTKE, P.; KEMPER, H. G.; FELD, T.; HOFFMANN, M. Industry 4.0. **Business and Information Systems Engineering**, v. 4, n. 6, p. 239-242, 2014.

LI, J.; TAO, F.; CHENG, Y.; ZHAO, L. Big data in product lifecycle management. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 81, n. 1, p. 667-684, 2015.

LUCKE, D.; CONSTANTINESCU, C.; WESTKÄMPER, E. Smart factory: a step towards the next generation of manufacturing. The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, In: **Manufacturing systems and technologies for the new frontier**. London: Springer, p. 115-118, 2008.

LUGERT, A.; VÖLKER, K.; WINKLER, H. Dynamization of Value Stream Management by technical and managerial approach. **Procedia CIRP**, v. 72, n. 1, p. 701-706, 2018.

MA, J.; WANG, Q.; ZHAO, Z. SLAE-CPS: Smart Lean Automation Engine Enabled by Cyber-Physical Systems Technologies. **Sensors**, v. 17, n. 7, p. 1500, 2017.

MARQUES, M.; AGOSTINHO, C.; ZACHAREWICZ, G.; GONÇALVES, R.J. Decentralized decision support for intelligent manufacturing in industry 4.0. **Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments**, v. 9, n. 3, p. 299-313, 2017.

MAYR, A.; WEIGELT, M.; KÜHL, A.; GRIMM, S.; ERLI, A.; POTZEL, M.; FRANKE, J. Lean 4.0 - A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0. **Procedia CIRP**, v. 72, n. 1, p. 622-628, 2018.

MIGUEL, P. A. C. Adoção do Estudo de Caso na Engenharia de Produção. In: MIGUEL, P.A.C. *et al.* (Eds.). **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

MRUGALSKA, B.; WYRWICKA, M.K. Towards lean production in industry 4.0. **Procedia Engineering**, v. 182, p. 466-473, 2017.

PORTER, M.E.; HEPPELMANN, J.E. How smart, connected products are transforming competition. **Harvard Business Review**. v. 11, n. 92, p. 64-88, 2014.

POWELL, D.; ROMERO, D.; GAIARDELLI, P.; CIMINI, C.; CAVALIERI, S. Towards Digital Lean Cyber-Physical Production Systems: Industry 4.0 Technologies as Enablers of Leaner Production. Advances in Production Management Systems. **IFIP WG 5.7 International Conference**, Seoul, Korea, August 26-30, 2018.

ROMERO, D., STAHR, J., WUEST, T., NORAN, O., BERNUS, P., FAST-BERGLUND, Å.; GORECKY, D. Towards an operator 4.0 typology: a human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies. In **Proceedings of the International Conference on Computers and Industrial Engineering (CIE46)**, Tianjin, China p. 29-31, 2016

ROMERO, D.; GAIARDELLI, P.; POWELL, D.; WUEST, T.; THÜRER, M. Digital Lean Cyber-Physical Production Systems: The Emergence of Digital Lean Manufacturing and the Significance of Digital Waste. In: **IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems**. Springer, Cham, p. 11-20, 2018.

RÜßMANN, M.; LORENZ, M.; GERBERT, P.; WALDNER, M.; JUSTUS, J.; ENGEL, P.; HARNISCH, M. **Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries**. Boston Consulting Group, n. 9, 2015.

SANDERS, A.; ELANGESWARAN, C.; WULFSBERG, J. Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. **Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 3, n. 9, p. 811-833, 2016.

SCHWAB, K. **The fourth industrial revolution**. New York: Crown Business, 2017.

WAGNER, T.; HERRMANN, C.; THIEDE, S. Industry 4.0 impacts on lean production systems. **Procedia CIRP**, v. 63, p. 125-131, 2017.

WALLACE, E.; RIDDICK, F. **Panel on Enabling Smart Manufacturing**. State College, USA, 2013.

YIN, R.K. **Case study research: design and methods**, 4th edition. Applied social research methods series, 5. SAGE Publication, Inc, 2009.