



ConBREpro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

Energias Limpas nas Engenharias

A INDÚSTRIA 4.0 E AS PRÁTICAS DO LEAN MANUFACTURING: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Udo Hans Sonntag

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) – Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Marcelo Gechele Cleto

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) – Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Agnelo Denis Vieira

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) – Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Aline Frazon

Engenharia de Produção – Universidade Federal do Paraná

Resumo: As mudanças industriais impulsionadas pelas novas tecnologias são cada vez mais frequentes, tornando essencial que as empresas se mantenham eficientes para permanecerem competitivas. No entanto, muitas enfrentam dificuldades em adotar as tecnologias da Indústria 4.0 e melhorar seu desempenho. A combinação dessas tecnologias com ferramentas do Lean Manufacturing pode facilitar a implementação e aumentar a performance dos sistemas de manufatura. A fim de conhecer o panorama, uma revisão sistemática da literatura (RSL) foi construída utilizando a base de dados Scopus com objetivo entender como as tecnologias da Indústria 4.0 se distribuem nas diferentes práticas do Lean Manufacturing. Os artigos foram definidos por meio de palavras-chave e foram considerados os artigos das áreas das engenharias e ciência da computação. Os termos utilizados foram em inglês e definiu-se como escopo os anos de 2010-2021. A busca original iniciou com 2871 e por meio da leitura dinâmica e dos filtros definidos para inclusão e exclusão chegou-se a uma amostra de 91 artigos. Com a análise destes artigos 6 eixos foram definidos em relação a prática da Indústria 4.0 combinadas às práticas de Lean Manufacturing são eles: Clientes, Qualidade, Produção, Logística, Pessoas e Fornecedor. Como resultado, a revisão sistemática possibilitou analisar um panorama das experiências existentes, onde ficou demonstrado que as tecnologias apoiam adequadamente e potencializam o uso das ferramentas do Lean Manufacturing.

Palavras-chave: Lean Manufacturing, Indústria 4.0, Revisão da literatura, melhoria contínua.

INDUSTRY 4.0 AND LEAN MANUFACTURING PRACTICES: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Abstract: Industrial changes driven by new technologies are increasingly frequent, making it essential for companies to remain efficient to remain competitive. However, many face difficulties in adopting Industry 4.0 technologies and improving their performance. Combining these technologies with Lean Manufacturing tools can facilitate implementation and increase the performance of manufacturing systems. To understand the panorama, a systematic literature review (SLR) was

constructed using the Scopus database with the aim of understanding how Industry 4.0 technologies are distributed across different Lean Manufacturing practices. The articles were defined by keywords and articles from the areas of engineering and computer science were considered. The terms used were in English and the scope was defined as the years 2010-2021. The original search started with 2871 and through dynamic reading and filters defined for inclusion and exclusion, a sample of 91 articles was reached. With the analysis of these articles, 6 axes were defined in relation to the practice of Industry 4.0 combined with Lean Manufacturing practices: Customers, Quality, Production, Logistics, People and Supplier. As a result, the systematic review made it possible to analyze an overview of existing experiences, where it was demonstrated that technologies adequately support and enhance the use of Lean Manufacturing tools.

Keywords: Lean Manufacturing, Industry 4.0, Literature review, continuous improvement.

1. Introdução

Empresas ao redor do mundo de todos os segmentos vêm enfrentando grandes desafios em função de crises econômicas, sendo necessário o estabelecimento de novas estratégias e busca constante de novas oportunidades de mercados com o objetivo de aumentar seus lucros. Além disto, as empresas são desafiadas a se adaptarem constantemente às novas necessidades e práticas de mercado em um ambiente cada vez mais dinâmico, com o objetivo de manter o crescimento sustentável de seus negócios (CHANG; CHENG, 2019).

Buscando se adaptar a essas novas necessidades as empresas necessitam melhorar continuamente seus processos produtivos, em busca de uma maior performance, disponibilidade, qualidade e consequente manutenção e satisfação dos clientes. A melhoria contínua é a procura incessante da eliminação de desperdícios com o objetivo de alcançar a perfeição (WOMACK; JONES, 1996). Além das ferramentas do Lean Manufacturing, é necessário um ambiente de trabalho promotor de mudança. Mudança de mentalidade, mas também de abertura a novas tecnologias que contribuam também para a redução de desperdícios. Ohno (1988) afirmou que, para auxiliar na consecução deste objetivo, os processos deveriam ser automatizados e supervisionados pelos colaboradores. Ele chamou esse princípio de Autonomia. Segundo Shingo (1996) e Ohno (1997), autonomia é “automação com um toque humano”, ou, conforme Monden (1984), “autonomia com a mente humana”. Ou seja, equipamentos dotados de procedimentos que se aproximam da inteligência humana (OHNO, 1997).

Com o surgimento da Indústria 4.0 (termo de origem alemã, utilizado para enquadrar a 4ª revolução industrial), emerge uma promissora forma de lidar com desafios futuros no ambiente de produção (KAGERMANN et al., 2013). A Indústria 4.0 está enraizada na fabricação avançada ou também chamada de conceito de Manufatura Inteligente, ou seja, um sistema adaptável onde as linhas flexíveis ajustam automaticamente os processos de produção para vários tipos de produtos e condições de mudança (WANG et al., 2016a; SCHUH et al., 2017). Segundo Schumacher et al. (2016), a indústria 4.0 refere-se aos recentes avanços tecnológicos, nos quais a internet e outras tecnologias funcionam como a estrutura básica para sua integração.

A Indústria 4.0 possibilita novas formas de desenvolvimento de produtos inteligentes, introduzindo ferramentas tecnológicas através das quais os princípios Lean podem ser promovidos. A combinação entre as ferramentas tradicionais do Lean Manufacturing e as tecnologias da Indústria 4.0 pode permitir a obtenção de maiores níveis de desempenho através da redução de retrabalho, decisões baseadas em dados, agilidade no descobrimento da causa raiz, redução de custos e aumento da produtividade (KOLBERG et al., 2017).

Portanto, a fim de explorar este panorama de como as empresas estão lidando com esta integração, uma revisão sistemática da literatura (RSL) foi construída utilizando a base de dados com objetivo entender como as tecnologias da Indústria 4.0 se distribuem nas

diferentes práticas do Lean Manufacturing e podem auxiliar no aumento de performance industrial.

2. Referencial teórico

O Lean Manufacturing é uma filosofia de gestão que tem por objetivo reduzir o desperdício através da eliminação dos processos que não agregam valor ao sistema produtivo. Os processos em sua grande maioria possuem atividades que não agregam valor, e é fundamental para qualquer organização trabalhar com foco no zero desperdício, para sobreviver nos mercados cada vez mais competitivos e globalizados como os atuais (YANG et al., 2011; HOFER et al., 2012).

A Indústria 4.0 surgiu a partir de estratégias do governo da Alemanha em 2011, com o objetivo de consolidar o país como líder na área de tecnologia, através do desenvolvimento de sistemas avançados de produção (KAGERMANN et al., 2013). A Indústria 4.0 representa uma nova revolução industrial dos sistemas de produção ao fazer a integração de tecnologias emergentes e convergentes que agregam valor ao longo de toda a cadeia produtiva (DALENOGARE et al., 2018).

Sanders et al. (2017) afirmam que o conceito do Lean Production não se tornará obsoleto com a chegada da Indústria 4.0. Na verdade, se tornará muito importante para a introdução eficaz da Indústria 4.0. Para eles, a maioria das ferramentas do Lean Production será favorecida com a entrada das tecnologias da Indústria 4.0, enquanto outras ferramentas serão consideradas facilitadoras ou pré-requisitos para introdução da Indústria 4.0. Ainda segundo os autores, entre as ferramentas que serão mais beneficiadas estão: TPM, Kanban, Automação, eliminação de desperdícios e suavização da produção. Neste sentido, Mayr (2018) destacou que o Lean Production e a Indústria 4.0 apresentam objetivos comuns, agregar valor ao cliente e reduzir desperdícios.

3. Metodologia

A Revisão Sistemática da Literatura foi realizada considerando a base de dados SCOPUS em três níveis diferentes de pesquisa. Essa revisão parte-se do pressuposto de que quanto maior a adoção das ferramentas Lean em uma empresa, maiores são os níveis de performance (indicadores) obtidos nos seus processos.

A Revisão Sistemática da Literatura foi realizada considerando a base de dados SCOPUS em três níveis diferentes de pesquisa. O primeiro nível relacionou termos mais abrangentes, envolvendo ambas as abordagens como, por exemplo, “Industry 4.0” e “Lean Manufacturing” ou “Industrie 4.0” e “Lean Management”. O segundo nível relacionou o termo Indústria 4.0 com os diferentes eixos (Cliente, Qualidade, Produção, Logística, Pessoas e Fornecedores) e o termo Lean como, por exemplo, “Industry 4.0”, “Quality” e “Lean Manufacturing”.

O terceiro nível envolveu termos relacionados às práticas do Lean Manufacturing nos seis eixos e às tecnologias da Indústria 4.0 como, por exemplo, para o eixo da Qualidade as práticas poka yoke, andon, quality control 100%, statistical process control, standard work e 5S, foram pesquisadas uma a uma com as tecnologias RFID, Internet of things, cloud, simulation, augmented and virtual reality, cyber physical systems, collaborative and autonomous robots, big data analytics e integrated systems. Os três níveis com os respectivos termos de busca e suas combinações são apresentados na Figura 1.

Figura 1- Termos utilizados na base para RSL

Termos de Busca	Resultados
#1: ((<i>"industry 4.0"</i> OR <i>"industrie 4.0"</i> OR <i>"smart factory"</i> OR <i>"cyber phisycal systems"</i>) AND (<i>"lean manufacturing"</i> OR <i>"lean production"</i> OR <i>"lean management"</i> OR <i>"world class manufacturing"</i>))	386
#2: ((<i>"industry 4.0"</i> AND (<i>"customer "</i> OR <i>"quality"</i> OR <i>"production"</i> OR <i>"employess"</i> OR <i>"logistic"</i> OR <i>"supplier"</i>) AND (<i>lean manufacturing</i>))	158
#3: ((<i>"customer AND lean"</i> OR <i>"pokayoke"</i> OR <i>"Andon"</i> OR <i>"Quality Control 100%"</i> OR <i>"statistical process control"</i> OR <i>"standar work"</i> OR <i>"5S AND lean"</i> OR <i>"Overall Equipment Effectiveness"</i> OR <i>"single minute exchange of die"</i> OR <i>"heijunka"</i> OR <i>"value stream mapping"</i> OR <i>"total productive maintenance"</i> OR <i>"continuos improvement"</i> OR <i>"visual factory"</i> OR <i>"waste/muda"</i> OR <i>"production planning & control"</i> OR <i>"Continuous flow"</i> OR <i>"pull production / Kanban"</i> OR <i>"just-in-time"</i> OR <i>"workplace safety and ergonomics AND lean"</i> OR <i>"training AND lean"</i> OR <i>"employee AND lean"</i> OR <i>"supplier development AND lean"</i> OR <i>"supplier feedback"</i>) AND (<i>"RFID"</i> OR <i>"Internet of things"</i> OR <i>"cloud"</i> OR <i>"simulation"</i> OR <i>"Augmented and Virtual Reality"</i> OR <i>"cyber physical systems"</i> OR <i>"Collaborative and autonomous robots"</i> OR <i>"big data analytics"</i> OR <i>"integrated systems"</i>))	2327
Total	2871

Fonte: os autores

Todos os artigos escritos em inglês disponíveis entre os anos 2010 e 2021 nas áreas de engenharia e ciência da computação foram considerados válidos. Com base nos parâmetros de busca acima definidos foram encontrados 2871 artigos na base de dados SCOPUS. Após uma primeira análise, com a leitura dos títulos na própria base de dados, foram selecionados 209 artigos e, após a leitura dos resumos, foram selecionados 149 artigos. Após esse primeiro filtro, a seleção dos artigos foi realizada em três fases diferentes de triagem: A primeira, relacionada à remoção dos artigos duplicados, a segunda, com critérios de inclusão e exclusão, e a terceira, com a análise de relevância.

A primeira fase teve como objetivo a remoção dos artigos duplicados, onde foram excluídos 11 artigos entre os 149 artigos previamente selecionados. Em seguida, foram verificados os títulos, resumos e palavras-chave, com o objetivo de analisar a aderência do conteúdo ao tema, sendo retirados 16 artigos. Além disso, somente artigos no idioma inglês foram selecionados, resultando na retirada de mais 5 artigos e a não disponibilidade do texto completo levou à retirada de mais 7 artigos. Desta forma, foram selecionados para a última fase 110 artigos, os quais foram analisados em relação à relevância para o desenvolvimento do trabalho, considerando soluções da Indústria 4.0 para o Lean Manufacturing. Ao final da revisão sistemática foram selecionados 91 artigos.

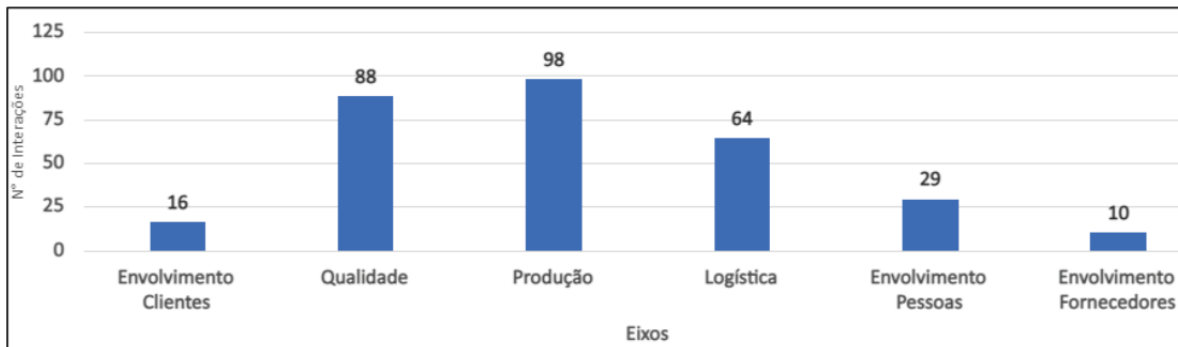
4. Resultados

Com o advento da Indústria 4.0 novas tecnologias puderam ser empregadas na melhoria dos processos e redução de desperdícios. A combinação entre ferramentas de Lean Manufacturing e tecnologias da Indústria 4.0 foi analisada em vários estudos recentes. Várias empresas de grande porte desenvolveram soluções para a melhoria de seus processos através da integração dos dois conceitos, permitindo atender às necessidades dos clientes de forma mais eficiente e com custos adequados. Para seleção dos eixos e práticas, trabalhos recentes relacionados à integração com as tecnologias e discutidos na revisão de literatura foram utilizados.

Segundo Ciano (2020), quase todas as tecnologias têm efeito positivo nas ferramentas do Lean exceto cibersegurança. As duas tecnologias retiradas foram substituídas pelas

tecnologias RFID (Radio Frequency Identification) e CPS (sistemas ciberfísicos), muito presente em estudos da literatura sendo aplicadas de forma ampla em conjunto com as demais tecnologias selecionadas. Robôs colaborativos (cobots) foram incluídos na tecnologia de robôs autônomos, seguindo o modelo adotado por Cefrio et al. (2016).

Figura 2- Os seis eixos identificados com a RSL

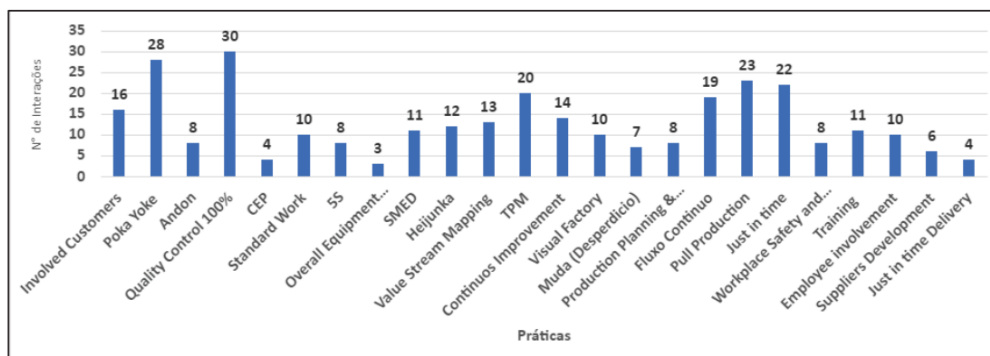


Fonte: os autores

A Figura 2 apresenta a distribuição das interações identificadas na literatura em cada um dos eixos definidos para o modelo. Entre as 305 interações, os eixos de produção, com 33% das interações, e qualidade com 29,3%, representam os eixos com maior destaque.

A Figura 3 apresenta a distribuição das interações identificadas em cada uma das práticas *lean*. Entre as 297 interações, as práticas com maior destaque são poka-yoke com 9,4% e controle da qualidade 100%, com 9,8%, ambas do eixo qualidade. Em seguida, a prática TPM e Fluxo Contínuo, com 6,7%, e Kanban, com 6%. Todas as práticas sofreram maior ou menor impacto em relação às tecnologias da indústria 4.0.

Figura 3- Frequência da prática do lean manufacturing identificadas com a RSL

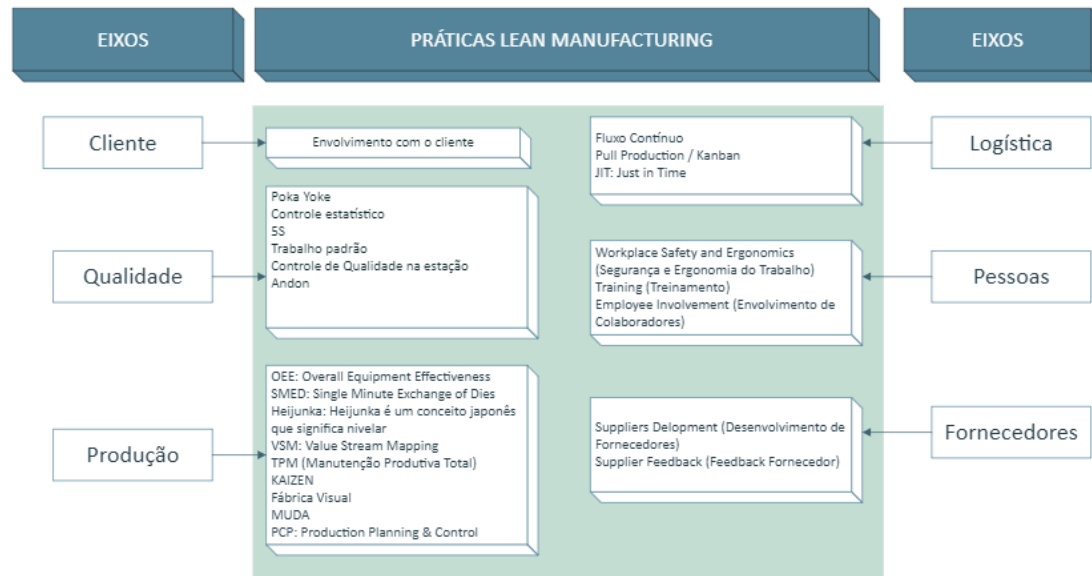


Fonte: os autores

Para cada um dos seis eixos uma tabela relacionando as práticas do *Lean Manufacturing* e as tecnologias da indústria 4.0 foi definida. As tabelas foram construídas a partir de artigos que demonstravam e/ou detalhavam a conexão entre as ferramentas do *Lean Manufacturing* e as tecnologias da indústria 4.0. Os eixos estabelecidos foram: Clientes, Qualidade, Produção, Logística, Pessoas e Fornecedor e suas respectivas práticas (Figura 4).

Figura 4- Os seis eixos estabelecidos entre as práticas lean manufacturing

Aplicações da Indústria 4.0 combinadas às práticas de Lean Manufacturing



Fonte: Os autores

A seguir os eixos e a conexão identificada na literatura entre as práticas *lean manufacturing* são apresentadas:

4.1 Clientes

Envolvimento com o cliente: Astola et al. (2017) desenvolveram um sistema de gestão de dados com tecnologia Big Data que permite o compartilhamento em tempo real com a base de clientes, aumentando o valor agregado, a eficiência e reduzindo custos e tempo de comunicação. D'Orazio et al. (2020) afirmam que uma plataforma compartilhada com clientes e fornecedores simplifica a complexidade relacional e o lead time, além de possibilitar o uso de AGVs acionados por máquinas e sistemas kanban, geridos autonomamente e otimizados em tempo real. Ciano et al. (2020) destacam que a simulação permite modularidade e personalização, analisando requisitos em fases preliminares. Sanders et al. (2016) relata que a incorporação de sistemas inteligentes prolonga o desenvolvimento com clientes até onde são possíveis ajustes, com QFD potencializado pelo Big Data e produtos inteligentes rastreáveis (RFID) para atender continuamente às necessidades dos clientes.

4.2 Qualidade

Poka Yoke: Segundo Jasti e Kodali (2015), o uso de CPS conectado via IoT facilita processos suscetíveis a falhas, monitorando produtos em tempo real com RFID e permitindo ajustes imediatos. A realidade aumentada projeta imagens para identificar não conformidades (Ciano, 2020) e pode otimizar processos como o Poka Yoke. Kolberg e Zühlke (2015) sugerem que a IoT fortalece a aplicação de Andon, enquanto Jaber e Bicker (2017) propõem um sistema de monitoramento de falhas para robôs usando sensores sem fio. Algoritmos de aprendizado, câmeras avançadas e CPS melhoram controles de qualidade ao identificar defeitos e prevenir erros. Realidade aumentada e aprendizado de máquina aumentam a precisão e qualidade em operações manuais e sistemas de monitoramento (KRAJCOVIC et al., 2021).

Controle Estatístico: Jaber e Bicker (2017) propuseram um sistema de detecção de falhas em robôs baseado em cartas de controle estatístico e monitoramento de vibração sem fio, útil para verificar a integridade de máquinas. D'Orazio et al. (2020) indicam que o CEP pode

ser aprimorado por meio de análise automática de dados em tempo real, proporcionando maior confiabilidade e agilidade nas análises. Ramírez et al. (2015) concluíram que o uso de realidade aumentada no CEP, especialmente para medições complexas, reduz o tempo de análise e melhora a precisão.

5S: Krajcovic et al. (2021) mostraram que a realidade aumentada melhora a satisfação e o aprendizado no 5S em comparação aos métodos tradicionais. D'Orazio et al. (2020) sugerem que robôs, exoesqueletos e simulações em realidade aumentada aumentam a segurança, reduzindo operações ergonômicas e prevenindo acidentes.

Trabalho Padrão: D'Orazio et al. (2020) afirmam que a tecnologia de Nuvem reduz o uso de documentos impressos no chão de fábrica, melhorando a precisão e o controle operacional. Müller et al. (2017) sugerem que o uso de CPS em toda a cadeia de valor digitaliza dados, facilitando o compartilhamento entre setores e reduzindo erros e ciclos de projetos. Silva et al. (2018) desenvolveram um aplicativo na Nuvem para criar procedimentos operacionais e gerar trabalhos padrão em tempo real. Ciano (2020) destaca que a exibição de JES no chão de fábrica permite atualizações ágeis e reduz erros. D'Orazio et al. (2020) também propõem o uso de realidade aumentada para treinar operadores e eliminar papel, aumentando a eficácia dos treinamentos.

Controle de qualidade nas estações: Durakbasa (2016) aponta que sensores e robótica são essenciais para a Indústria 4.0, onde robôs de medição inteligentes viabilizam a automação flexível no controle de qualidade. Powel et al. (2019) indicam que supervisores recebem alertas de ocorrências em smartphones, com a IoT e Nuvem suportando um Sistema de Gestão da Qualidade Digital e monitoramento em tempo real. D'Orazio (2020) reforça que esses sistemas aumentam a confiabilidade e a agilidade na resposta a falhas. Ciano (2020) complementa que a IoT possibilita o Controle Estatístico de Processos em tempo real via smartphones.

Andon: Kolberg e Zühlke (2015) e Mrugalska e Wyrwicka (2017) destacam que HCI, como smartphones e relógios inteligentes, substitui as lâmpadas de Andon, permitindo notificações e decisões em tempo real. Ciano et al. (2020) afirmam que máquinas inteligentes com sensores e câmeras detectam falhas e solicitam reparos por dispositivos móveis, aprimorando o Andon. Além disso, a IoT aplicada ao Andon facilita a comunicação entre produtos e sistemas CPS, que identificam defeitos e acionam reparos automaticamente.

4.3 Produção

OEE: D'Orazio (2020) afirma que a IoT permite monitorar o OEE da planta na nuvem com precisão e em tempo real, acessível a operadores em dispositivos móveis. Big Data e Analytics aprimoram o Controle Estatístico de Processos, fornecendo KPIs, como o OEE em tempo real, para identificar causas de gargalos (CIANO et al., 2020).

SMED: Kolberg e Zühlke (2015) desenvolveram uma interface para digitalizar a Produção Enxuta via CPS, aumentando a flexibilidade e facilitando a integração das células de trabalho. Rosin et al. (2020) indicam que a maioria dos estudos sobre o apoio da Indústria 4.0 ao Lean Manufacturing se concentra na IoT, essencial para rastrear materiais e recuperar informações (Mayr et al., 2018). Tuominen (2016) apresenta uma célula de soldagem com robôs colaborativos, permitindo mudanças frequentes de produto e produção de lotes menores em uma única estação.

Heijunka: Ciano (2020) mostra que robôs colaborativos aceleram o One-Piece-Flow em manufatura, substituindo operadores humanos e mantendo a linha equilibrada. A simulação, segundo o autor, auxilia na escolha do melhor layout para garantir o fluxo contínuo e a produção Just in Time, além de, com Big Data e IA nivelar a carga produtiva.

Rosin et al. (2020) também apontam a simulação para detectar gargalos e melhorar a eficiência. Mayr et al. (2018) utilizam o software Anapro para otimizar o planejamento.

Value Stream Mapping (VSM) e Kaizen / Melhoria Contínua: Segundo Sony (2018), a integração de sistema facilita o mapeamento do fluxo de valor devido a um maior compartilhamento de informações. As tecnologias Big Data Analytics e simulação são incorporadas ao processo de melhoria contínua para o estabelecimento do fluxo ideal (STOJANOVIC; MILENOVIC, 2018)

Total Productive Maintenance (TPM): Segundo Mayr et al. (2018), Sanders et al. (2016) e Kolberg e Zühlke (2015), equipamentos inteligentes possuem a capacidade de monitorar sua capacidade de carga, desgastes e anomalias durante o seu funcionamento através de sensores, atuadores e outros dispositivos. Através da Internet das Coisas, estes equipamentos são interconectados com sistemas de informação e comunicação na Nuvem, permitindo notificar anomalias para os operadores de produção e equipe de manutenção.

Fábrica Visual: Segundo Saez et al. (2018), a tecnologia de simulação pode ser utilizada para fornecedores, indicadores e dados aos gestores, por outro lado Kolberg e Zühlke (2015) sugerem a utilização da tecnologia Realidade Aumentada para apresentação dos dados.

MUDA (Atividade que gera desperdício): Segundo Cefrio (2016) e Mayr (2018), o desperdício pode ser melhorado através da utilização da Internet das Coisas. O rastreamento dos produtos em tempo real proporcionado pela tecnologia permite avaliar processos e transportes desnecessários

Planejamento e Controle da Produção - PCP: Kukushkin et al. (2015) apresentou um conceito inovador relacionado à análise de programação de linhas de produção com base na tecnologia de simulação. Este modelo permite o estabelecimento de programações em nível avançado e geração automática de indicadores relacionados. Da mesma forma, Dallasega et al. (2017) desenvolveu um processo de programação em tempo real, com base na mesma tecnologia, que possibilitou a redução de níveis de estoque no ambiente de produção através da produção contra pedido e entrega JIT

4.4 Logística

Fluxo contínuo: A Internet das Coisas é sugerida por Müller et al. (2018) e Wagner, Hermmann e Thiede (2017) para apoiar o fluxo contínuo em relação à capacidade de monitoramento, uma vez que através da tecnologia é possível rastrear os produtos em tempo real e manter a gestão informada por meio de dados enviados automaticamente. Kumar et al. (2018) propuseram a tecnologia “Nuvem” como meio para manter a gestão informada.

Kanban / Pull Production (Sistema Puxado): Valamede et al. (2020) destacam que o Big Data Analytics aprimora o Kanban ao reduzir estoques intermediários, oferecendo monitoramento em tempo real e controle de estoque inteligente. Um sistema Kanban suportado por simulação virtual permite visualizar cenários e antecipar problemas no fluxo produtivo. Kaspar e Schneider (2015) apontam que AGVs autônomos facilitam o Kanban ao entregar materiais em contêineres, dispensando reabastecimentos frequentes. Ciano (2020) reforça que AGVs autônomos melhoram a entrega de produtos para células de produção e áreas de estoque.

Just in Time (JIT): Wagner, Hermmann e Thiede (2017) propõem um CPS para substituir cartões Kanban por meio de integração vertical, visando garantir entregas JIT. Gil-Vilda et al. (2017) destacam que robôs colaborativos em linhas de montagem também aumentam a produtividade e precisão do JIT. A tecnologia em nuvem e AGVs automatizam processos logísticos, ajustando a produção às demandas em tempo real, e reduzem erros e

deslocamentos desnecessários (Mayr et al., 2018). Müller et al. (2018) enfatizam o uso de AGVs para definir rotas autônomas, enquanto Negahban e Smith (2014) sugerem a simulação para otimizar essas rotas.

4.5 Pessoas

Segurança e Ergonomia no Trabalho: D'Orazio (2020) afirma que câmeras e sistemas de alarme ajudam a monitorar o uso de EPIs, enquanto a inteligência artificial pode paralisar equipamentos em situações de risco, além de desenvolver soluções via aprendizado de máquina. A realidade aumentada permite a verificação em tempo real dos parâmetros de processo, ajudando a identificar riscos. Robôs colaborativos e exoesqueletos auxiliam operadores em tarefas não ergonômicas, reduzindo problemas e aumentando o comprometimento (CIANO et al., 2020).

Treinamento: Lu e Yue (2011) sugerem o uso de simulação para treinar operadores em um ambiente virtual que replica o real, permitindo o aprendizado dos procedimentos padrão de produção. Essas orientações podem ser acessadas por etiquetas RFID ou dispositivos de realidade aumentada. Powell et al. (2019) também apresentam um sistema e-learning para capacitar operadores, destacando-o como uma estratégia para implementar tecnologias da Indústria 4.0, acelerando o início das operações e aumentando a produtividade em uma fábrica no México.

Envolvimento dos colaboradores: Valamede (2020) afirma que a integração de simulação e realidade aumentada aprimora a relação homem-máquina, capacitando operadores a entender melhor os processos e a resolver problemas de forma crítica. Kolberg e Zühlke (2015) complementam que falhas são automaticamente notificadas a operadores via smartwatches, aumentando a motivação no trabalho. D'Orazio (2020) destaca que ambientes virtuais para testes online permitem avaliar rapidamente o conhecimento dos operadores, facilitando a identificação de lacunas e o treinamento, enquanto etiquetas RFID proporcionam acesso imediato a documentos e informações úteis no chão de fábrica

4.6 Fornecedores

Desenvolvimento dos fornecedores e Feedback dos fornecedores: A tecnologia de computação em nuvem e dispositivos móveis permite uma comunicação constante e atualizada entre fabricantes e fornecedores. Redes tecnológicas facilitam o compartilhamento de dados, ativos intangíveis e tangíveis, promovendo uma cooperação eficiente desde o desenvolvimento até a venda dos produtos, com uma configuração descentralizada e flexível (SANDERS et al., 2016). Segundo Ciano et al. (2020), a integração vertical e horizontal, com suporte da Internet das Coisas, permite que dados de desempenho sejam compartilhados em tempo real, capacitando fornecedores a melhorar suas estratégias de entrega.

5. Conclusão

Este artigo elaborou uma revisão sistemática da literatura com objetivo de entender como as tecnologias da Indústria 4.0 se distribuem nas diferentes práticas do Lean Manufacturing. Seis grandes eixos das práticas do Lean Manufacturing foram elencados e por meio dos 91 artigos pré-selecionados, após a inclusão e exclusão de filtros, para se estabelecer uma amostra adequada para estudo. Os seis eixos elencados foram: Clientes, Qualidade, Produção, Logística, Pessoas e Fornecedor. Como resultado buscou-se apresentar as interações já identificadas na literatura entre as práticas Lean Manufacturing e as tecnologias da Indústria 4.0, apresentando, desta forma um panorama das experiências existentes, onde as tecnologias demonstraram apoiar adequadamente e potencializar o uso das ferramentas. Dentre as tecnologias da 4.0 podem-se destacar o uso do big date, sensores, robôs, IoT, Nuvem, realidade virtual, inteligência artificial, entre outras. Como

trabalhos futuros espera-se que essa revisão sistemática da literatura possa servir para construção de modelos que ajudem a mensurar o nível de maturidade de empresas industriais que permita avaliar o nível de adoção das tecnologias da Indústria 4.0 e também, dê suporte o processo de introdução destas tecnologias a partir das práticas do Lean Manufacturing para o aumento de performance industrial em empresas do setor metalmeccânico.

Referências

ASTOLA, P. J.; RODRÍGUEZ, P.; BOTANA, J.; MARCOS, M. "A paperless based methodology for managing Quality Control. Application to a I+D+i Supplier Company," **Procedia Manuf.**, vol. 13, pp. 1066–1073, 2017.

CEFRIIO. Prendre part à la révolution manufacturière? Du rattrapage technologique à l'Industrie 4.0 chez les PME [Getting on the Manufacturing Revolution? **Technological Catching Up with Industry 4.0 by SME**]. Montreal: CEFRIIO, 2016.

CIANO, M. P., DALLASEGA, P., ORZES, G., & ROSSI T. (2021). One-to-one relationships between Industry 4.0 technologies and Lean Production techniques: a multiple case study. **International journal of production research**, 59(5), 1386- 1410.

CHANG, A.Y., & CHENG, Y.T. Analysis model of the sustainability development of manufacturing small and medium-sized enterprises in Taiwan. **Journal of Cleaner Production**, 207(10), 458–473. 2019.

DALEGRONE L. S., BENITEZ, G. B., AYALA, N. F., & FRANK, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. **International Journal of production economics**, 204, 383-394.

D'ORAZIO, L.; MESSINA, R; SCHIRALDI, M. Industry 4.0 and World Class Manufacturing Integration: 100 Technologies for a WCM-I4.0. **Matrix. Applied Sciences**, v. 10, n. 14, p. 4942, 2020.

DURAKBASA, M. N.; BAUER, J. M.; KRÄUTER, L.; BAS, G. "Novel developments in advanced manufacturing and Multi Functional Intelligent Factories (MFIF) towards production in the future - **Challenges of automation in industry 4.0**". 2016.

HOFER, C.; EROGLU, C.; HOFER, R. The Effect Of Lean Production On Financial Performance: The Mediating Role Of Inventory Leanness. **International Journal Of Production Economics**, v. 138, n. 2, p. 242–253, 2012.

JABER, A.; BICKER, R. Wireless Fault Detection System for an Industrial Robot Based on Statistical Control Chart. **International Journal of Electrical and Computer Engineering**, v. 76, p. 3421-3435, 2017.

JASTI, N. V. K.; KODALI, R. Lean production: Literature review and trends. **International Journal of Production Research**, pp. 867-885. 2015.

KAGERMANN, H., W. WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Securing the Future of German Manufacturing Industry**: Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0, München, 2013.

KASPAR, S.; M. SCHNEIDER. "Lean und Industrie 4.0 in der Intralogistik: Effizienzsteigerung durch Kombination der beiden Ansätze". **Gestão da Produtividade** 20 (5): 17 – 20, 2015.

KRAJČOVIČ, M.; GABAJOVÁ, G.; FURMANNOVÁ, B.; VAVRÍK, V.; GAŠO, M.; MATYS, M. "A Case Study of Educational Games in Virtual Reality as a Teaching Method of Lean Management". **Electronics**, v. 10, n. 7, p. 838, 2021.

- KOLBERG, D.; KNOBLOCH, J.; ZÜHLKE, D. Towards a lean automation interface for workstations. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 10, p. 2845-2856, 2017.
- KOLBERG, D.; ZUHLKE, D. Lean Automation Enabled by Industry 4.0 Technologies. **Ifac – Papers Online**, v. 48, n. 3, p. 1870-1875, 2015.
- KUKUSHKIN, I.; A. ZAVRAZHINA, J. GRABENWEGER, B. KATALINIC, A. KILDIBEKOV, D. HASKOVIC, “Modelbased concept for scheduling analysis of packaging lines,” in Annals of DAAAM and **Proceedings of the International DAAAM Symposium**. vol. 2015–Janua, pp. 1149–1157, 2015.
- KUMAR, M., R. VAISHYA, AND P. PARAG. “Real-Time Monitoring System to Lean Manufacturing.” **Procedia Manufacturing** 20: 135–140, 2018
- LU, S.; YUE, H. “Real-time data driven visual simulation of process manufacturing: A case study.” **Proceedings of the 2011 Chinese Control and Decision Conference**, CCDC 2011, 1806–1809. 2011
- MAYR, A.; WEIGELT, M.; KÜHL, A.; GRIMM, S.; ERL, A.; POTZEL, M.; FRANKE, J. Lean 4.0 - A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0, **Procedia CIRP**, v. 72, p. 622-628, 2018.
- MRUGALSKA, B.; WYRWICKA, M. K. “Towards Lean Production in Industry 4.0.” 7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management. **Procedia Engineering**, v. 182. p. 466–473, 2017
- MÜLLER, R.; VETTE, M.; HÖRAUF, L.; SPEICHER, C.; BURKHARD, D. “Lean Information and Communication Tool to Connect Shop and Top Floor in Small and Medium-sized Enterprises,” **Procedia Manuf.**, vol. 11, pp. 1043–1052, 2017.
- NEGAHBAN, A.; J. S. SMITH. “Simulation for Manufacturing System Design and Operation: Literature Review and Analysis.” **Journal of Manufacturing Systems** 33 (2): 241–261. 2014
- OHNO, T. **O Sistema Toyota de Produção: além da produção em larga escala**. Porto Alegre: Bookman, 1997
- OHNO, T. **The Toyota Production System: Beyond large-scale production**. Portland, Oregon: Productivity Press, 1988.
- POWELL, Daryl et al. Towards digital lean cyber-physical production systems: Industry 4.0 technologies as enablers of leaner production. In: **Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2018, Seoul, Korea, August 26-30, 2018, Proceedings, Part II**. Springer International Publishing, 2018. p. 353-362.
- RAMÍREZ, H.; MENDOZA, E.; MENDOZA, M.; GONZÁLEZ, E. Application of Augmented Reality in Statistical Process Control, to Increment the Productivity in Manufacture. **Procedia Computer Science**, v. 75. p. 213-220, 2015.
- ROSIN, F.; FORGET, P.; LAMOURI, S.; PELLERIN, R. Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles. **International Journal of Production Research**, v. 58, n.6, p. 1644-1661, 2020
- SAEZ, M., F. MATURANA, K. BARTON, AND D. TILBURY. “Real-time hybrid simulation of manufacturing systems for performance analysis and control.” **IEEE International Conference on Automation Science and Engineering**, October, 526– 531. 2015

- SANDERS, A.; SUBRAMANIAN, K.; REDLICH, T.; WULFSBERG, J. Industry 4.0 and Lean Management – Synergy or Contradiction? **IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems**. p. 341-349, 2017.
- SCHUMACHER, A.; EROL, S.; SIHN, W. A maturity model for assessing industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. **Procedia CIRP**, v. 52, p. 161-166, 2016.
- SCHUH, Günther et al. Industrie 4.0 maturity index. **Managing the digital transformation of companies**. Munich: Herbert Utz, 2017.
- SHINGO, S. **O Sistema Toyota de Produção: do ponto de vista da engenharia de produção**. Porto Alegre: Bookman, 1996.
- SILVA, F. et al., “Cloud computing environments for simulation of adaptable standardized work and electronic work instructions in industry 4.0,” in 16th **International Industrial Simulation Conference**. ISC 2018, pp. 49–53, 2018.
- SONY, M. “Industry 4.0 and Lean Management: A Proposed Integration Model and Research Propositions.” **Production & Manufacturing Research** 6 (1): 416– 432. 2018.
- TUOMINEN, V. “The measurement-aided welding cell-giving sight to the blind,” **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** vol. 86, no. 1–4, pp. 371–386, 2016.
- VALAMEDE, Luana Sposito; AKKARI, Alessandra Cristina Santos. Lean 4.0: A new holistic approach for the integration of lean manufacturing tools and digital technologies. **International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences**, v. 5, n. 5, p. 851, 2020.
- WAGNER, T.; HERRMANN, C.; THIEDE, S. Industry 4.0 impacts on lean production systems. **Procedia CIRP**, v. 63, p. 125–131, 2017.
- WANG, J.; ZHAO, Z.; WAN, J.; MA, H.; LI, MA. J. “Lean Intelligent Production System and Value Stream Practice,” in **3rd International Conference on Economics and Management** (ICEM 2016), 2016, pp. 442–447.
- WOMACK, J. P.; JONES, D. T. **Lean Thinking: Banish waste and create wealth in your company**. New York: Free Press, 2003.
- YANG, M.; HONG, P.; MODI, S. Impact of lean manufacturing and environmental management on business performance: An empirical study of manufacturing firms, **International Journal of Production Economics**, v. 129, n. 2, p. 251-261, 2011.