



University of  
Texas Libraries



e-revist@s

Sumários.org



Centro Unversitário Santo Agostinho

revistafsa

[www4.fsnet.com.br/revista](http://www4.fsnet.com.br/revista)

Rev. FSA, Teresina, v. 20, n. 11, art. 1, p. 3-18, nov. 2023

ISSN Impresso: 1806-6356 ISSN Eletrônico: 2317-2983

<http://dx.doi.org/10.12819/2023.20.11.1>

DOAJ DIRECTORY OF  
OPEN ACCESS  
JOURNALS

WZB  
Wissenschaftszentrum Berlin  
für Sozialforschung



Zeitschriftendatenbank



MIAR



Diadorim

## A Adoção de Tecnologias da Indústria 4.0 para Fomentar Práticas de Manufatura Verde

### Adoption of Industry 4.0 Technologies to Foster Green Manufacturing Practices

#### Dusan Schreiber

Doutor em Administração pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Professor titular da Universidade FEEVALE

E-mail: [dusan@feevale.br](mailto:dusan@feevale.br)

#### Bruna Haubert

Doutoranda em Qualidade Ambiental pela Universidade Feevale

E-mail: [bruhaubert@gmail.com](mailto:bruhaubert@gmail.com)

---

#### Endereço: Dusan Schreiber

ERS 239, 2755 – Novo Hamburgo, RS CEP: 93.510-235,  
RS, Brasil.

#### Endereço: Bruna Haubert

ERS 239, 2755 – Novo Hamburgo, RS CEP: 93.510-235,  
RS, Brasil.

#### Editor-Chefe: Dr. Tonny Kerley de Alencar Rodrigues

Artigo recebido em 08/06/2023. Última versão  
recebida em 01/08/2023. Aprovado em 02/08/2023.

Avaliado pelo sistema Triple Review: a) Desk Review  
pelo Editor-Chefe; e b) Double Blind Review  
(avaliação cega por dois avaliadores da área).

Revisão: Gramatical, Normativa e de Formatação



## RESUMO

O cenário econômico atual tem exigido maiores esforços por parte das indústrias em aspectos que se referem à sustentabilidade. A adoção de práticas sustentáveis, nos processos produtivos industriais, representa a estratégia de gestão que pode agregar diversos benefícios econômicos. Além disso, o alinhamento do modelo de gestão aos objetivos de desenvolvimento sustentável é considerado, atualmente, a condição essencial para que a organização possa obter acesso a fontes de financiamento a custos reduzidos, ter prioridade em editais públicos e conseguir parceiros internacionais, seja para exportação direta ou indireta. Entende-se que o avanço das tecnologias emergentes, que abarcam a indústria 4.0, representa um grande potencial de transformação para a indústria no que concerne à produtividade, redução de custos, controle de processos, customização de produção entre outros fatores, que podem contribuir com os objetivos de sustentabilidade e Manufatura Verde. Neste sentido, por meio de uma revisão teórica, o presente estudo objetiva apresentar e discutir acerca de algumas das tecnologias que compreendem o escopo da Indústria 4.0 e sua potencial relação com o fomento de práticas de Manufatura Verde.

**Palavras-chave:** Fábricas Inteligentes. Indústria 4.0. Sustentabilidade.

## ABSTRACT

The current economic scenario has required greater efforts on the part of industries in aspects that refer to sustainability. The adoption of sustainable practices in industrial production processes represents a management strategy that can add several economic benefits. In addition, the alignment of the management model with sustainable development objectives is currently considered an essential condition for the organization to obtain access to sources of financing at reduced costs, to have priority in public notices and to obtain international partners, whether for export. direct or indirect. It is understood that the advancement of emerging technologies, which encompass industry 4.0, represents a great potential for transformation for the industry in terms of productivity, cost reduction, process control, production customization, among other factors, which can contribute to sustainability and Green Manufacturing goals. In this sense, through a theoretical review, the present study aims to present and discuss some of the technologies that comprise the scope of Industry 4.0 and its potential relationship with the promotion of Green Manufacturing practices.

**Keywords:** Smart Factories. Industry 4.0. Sustainability.

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, nota-se uma crescente conscientização sobre a importância de preservar os recursos naturais. Em decorrência dessa necessidade, certificações como a ISO 14.001 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015) foram estabelecidas visando melhorar e contribuir com a proteção ambiental, por parte das organizações (YANG; YANG; PENG, 2011). A pressão regulatória, bem como as demandas crescentes pela qualidade ambiental exigem maiores esforços das indústrias para que reduzam consideravelmente ou eliminem os impactos ambientais resultantes de seus processos.

Considerando os referidos aspectos de sustentabilidade, a Manufatura Verde é, em sua concepção, uma produção que visa mitigar os impactos ambientais, reduzindo a demanda de materiais que não sejam de fontes renováveis, incluindo: insumos, materiais auxiliares de produção, energia, inclusive todos os demais fatores de produção, como hora-máquina, hora-homem (BAINES *et al.*, 2012).

Entende-se que questões de proteção ambiental se tornarão um fator chave no apoio ao desenvolvimento sustentável das empresas. À vista disso, entende-se que a indústria 4.0 pode trazer contribuições significativas, revelando-se um conjunto de práticas operacionais e de gestão inovadoras que permitem às empresas reduzirem seu impacto ambiental e aumentar sua eficiência econômica.

Conforme evidenciam Tsai e Lai (2018), a disponibilização de produtos altamente poluentes ao meio ambiente, decorrentes da atividade industrial, é uma das principais fontes de degradação do meio ambiente. Considerando este cenário, o qual emite um alerta importante, é possível encontrar suporte no avanço iminente das tecnologias, que se evidenciam como ferramentas de apoio e que fomentam processos mais inteligentes em termos de consumo de recursos, facultando maior eficiência e flexibilidade no desenvolvimento de produtos mais sustentáveis, de inúmeros segmentos.

As indústrias que adotam os métodos da produção verde trabalham com uma visão de longo prazo e, portanto, considera-se essencial identificar quais são as tecnologias, atualmente disponíveis no mercado, que podem contribuir para a adoção de práticas operacionais verdes – Manufatura Verde. Nesta perspectiva, destaca-se o conjunto de tecnologias da Indústria 4.0, tais como a computação na nuvem e big data, robotização, inteligência artificial, manufatura aditiva, aprendizagem máquina e utilização de sensores inteligentes, realidade virtual e aumentada, bem como a internet das coisas (BARRETO *et*

*al.*, 2017; HOFMANN; RÜSCH, 2017; LI, 2017; LU, 2017; FETTERMANN *et al.*, 2018; DALENOGARE *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2018).

Para promover a bem-sucedida integração da indústria 4.0 dentro do sistema tradicional da manufatura, é recomendado que haja uma preparação prévia, com base na adoção de requisição de materiais no software MRERP (materials requirements enterprise resource planning) e do sistema de planejamento de produção e controle da manufatura inteligente (PPCSMS) suportado pelo sistema cibernético e físico (IoT) orientado para os controles de máquinas e coleta de dados, otimização e controle de sistemas baseado no banco de dados apropriado (big data), preferencialmente com processamento na nuvem (TRSTENJAK; COSI, 2017).

Diversos estudos já foram realizados com o referido intuito, ou seja, de evidenciar as possibilidades das tecnologias da indústria 4.0 em contribuir para a sustentabilidade, especialmente para as práticas estruturantes da economia circular (ZHONG *et al.*, 2017; FATORACHIAN; KAZEMI, 2018). Hofmann e Rüschi (2017) argumentaram que a crescente adoção de automação industrial e logística reversa, baseadas em benefícios proporcionados, com destaque para a redução de custos, já evidencia o potencial de contribuição das tecnologias da indústria 4.0 para tornar as organizações sustentáveis.

A constatação similar fizeram os pesquisadores Oliveira *et al* (2017) ao perceberem os benefícios para a redução do impacto ambiental, após a combinação do modelo de Smart Factory, e a integração de sistemas físicos com os virtuais com as práticas de Análise de Ciclo de Vida do Produto e Ecodesign. Esta percepção encontra respaldo na afirmação de Moeuf *et al* (2018): “... a adoção da indústria 4.0 facilita a adoção de práticas verdes, que resultam em produtos sustentáveis, que não prejudicam o meio ambiente”.

Neste contexto, a presente pesquisa tem o propósito de apresentar e discutir acerca de algumas das tecnologias que compreendem o escopo da Indústria 4.0 e sua potencial relação com o fomento de práticas de Manufatura Verde. O estudo apresenta conceitos de Manufatura Verde, relacionando os respectivos aspectos de sustentabilidade, seguido de conceitos da Indústria 4.0 e as tecnologias habilitadoras. Os conceitos e definições estruturantes dos referidos temas foram extraídos de obras publicadas nos últimos dez anos, quando a vertente teórica acerca de tecnologias da indústria 4.0 foi consolidada por pesquisadores alemães. O segundo critério de seleção foi a relevância das obras, orientada por fator de impacto dos periódicos científicos e número de citações dos artigos. A pesquisa dos artigos ocorreu no mês de fevereiro de 2021, utilizando a base SCOPUS, filtrando por meio de palavras-chave combinadas e isoladamente: “Technologies of industry 4.0” e

“Green Manufacture”. Os artigos que foram indicados pela plataforma foram analisados sob a perspectiva de aderência temática, fazendo a leitura inicial dos resumos, palavras-chave, considerações finais e método de pesquisa. Após a exposição dos conceitos, apresenta-se a discussão e as considerações finais, bem como limitações e sugestões de pesquisas futuras.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Manufatura Verde e o Desenvolvimento Sustentável

O termo Desenvolvimento Sustentável foi apresentado originalmente pelo Relatório Brundtland em 1987 (REDCLIF, 2005), em que previa satisfazer as necessidades atuais, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades. No entanto, entende-se que a abrangência ideológica do conceito deve ser largamente ampliada, visto que simplesmente preservar as capacidades de gerações futuras não basta, *per se*.

A atividade industrial, que é considerada a segunda maior atividade geradora de impactos ambientais (RIEGEL; STAUDT; DAROIT, 2012; OLIVEIRA NETO *et al.*, 2015), desencadeia diversos problemas como a poluição de corpos hídricos com o descarte inadequado de resíduos, a devastação de florestas, poluição atmosférica e aquecimento global com emissão de gases de efeito estufa, além de impactos que desencadeiam o desbalanço da cadeia alimentar, impactos na saúde humana, na fauna e flora, dentre outros efeitos nocivos ao planeta de modo geral.

Entende-se que os sistemas econômicos precisam se sustentar, para manter em equilíbrio os sistemas sociais, suprindo as necessidades humanas. No entanto, é preciso prioritariamente manter os recursos naturais que fornecem subsídios aos sistemas anteriores, é neste ciclo que a sustentabilidade deve se estabelecer. É preciso compreender que a indústria moderna, impulsionada pela crescente demanda da sociedade consumidora, avança na exploração de recursos de forma simultânea à degradação ambiental, provocada em consequência da sua atividade, comprometendo diretamente a sustentabilidade.

Em contrapartida ao avanço da indústria no consumo demorado de recursos naturais, apresenta-se a Manufatura Verde, que preconiza a incorporação de práticas de produção orientadas ao verde, ou seja, a preservar recursos e mitigar impactos ambientais. As práticas de Manufatura Verde podem contribuir positivamente com a redução deste quadro e com os objetivos de sustentabilidade. Nesse sentido, a Manufatura Verde objetiva desenvolver produtos que gerem pouco ou nenhum impacto ambiental. Usualmente, os produtos

considerados verdes ou ecológicos podem ser produzidos a partir de resíduos reciclados e/ou fabricados com métodos mais eficientes, no que tange ao consumo de recursos naturais, humanos e de fontes não renováveis (DEIF, 2011; TSAI; LAI, 2018).

O termo Manufatura Verde também é associado a tecnologias de energia sustentável como fotovoltaicas, turbinas eólicas, biorreatores e biofiltração. Objetivando reduzir a entrada de fontes não renováveis e reduzir a saída de efluentes no processo produtivo industrial, incentiva-se o reaproveitamento para, por exemplo, transformar em subprodutos ao invés de dispor ao meio ambiente de maneira incorreta. Além disso, estratégias de substituição de matérias-primas são válidas, como substituir produtos tóxicos por produtos não tóxicos, de fontes não renováveis por renováveis (DEIF, 2011).

O conceito de Manufatura Verde evolui ao longo do tempo conforme evoluem também as práticas de gestão ambiental, citam Silva, Silva e Ometto (2016). Os referidos autores descrevem a evolução do termo, partindo inicialmente com a finalidade de implantar soluções de tratamento ao final do processo, para controle de saídas. Conforme mudaram as práticas de gestão ambiental, onde migram de uma perspectiva corretiva para preventiva, o conceito foi angariando outras perspectivas, que incluem gestão e prevenção desde a entrada de insumos, monitoramento com uso de indicadores e avaliação de ciclo de vida de produtos.

Cabe salientar que a Manufatura Verde possui foco na redução do consumo de recursos, assim como possui foco na mitigação de resíduos e efeitos nocivos ao meio ambiente. Nesse sentido, no processo de análise do ciclo de vida dos produtos, deve-se incluir os esforços pós-produção, bem como a mensuração de emissões de gases, efluentes líquidos, perdas de energia, dentre outras saídas, que acompanham o produto (SILVA; SILVA; OMETTO, 2016).

Deif (2011) aponta 3 aspectos principais como justificativa para adoção de técnicas de Produção Verde: (1) eficiência ecológica, (2) participação de mercado e (3) adequação a normas e diretrizes governamentais. Em relação ao aspecto da eficiência ecológica, Deif (2011) relata que tempo e energia é dinheiro, sendo assim, desenvolver um produto de forma mais eficiente, que consuma menos recursos ou energia é uma estratégia expectável. Corroborando o exposto, produzir com menos desperdícios, além de ser ecológico, é economicamente atrativo. *A priori*, o investimento em iniciativas de produção verde se reverterá em economia como resultado de um sistema mais eficiente. No tocante à participação de mercado, percebe-se que o consumidor tem valorizado empresas que adotam

medidas de responsabilidade ambiental. Por fim, em função da larga escala de geração de resíduos, a adequação às normas é imprescindível.

Ampliando a abrangência do termo, a Manufatura Verde deve ser um modelo aplicado não somente ao setor produtivo, mas em todas as esferas da cadeia produtiva, compreendendo desde o planejamento até a distribuição do produto final. Toke e Kalpande (2019) e Pang e Zhang (2019) relatam que a lógica do pensar verde deve ser inserida no planejamento, tanto da produção quanto na política de compras de insumos. Da mesma forma que deve ser pensado na adoção de fontes de energia limpas e renováveis, adoção de indicadores para controle e monitoramento de energia, águas residuais, emissões atmosféricas e resíduos sólidos.

Deif (2011) e Afum (2020) sugerem que métricas sejam adotadas para análise quantitativa de resultado da Manufatura Verde. Como exemplo, alguns dados que podem ser coletados e monitorados: resíduos sólidos, impacto ambiental, emissão de poluentes, impressão de carbono, consumo de energia, índice de materiais não recicláveis. Podem ser criadas técnicas para coleta e registro de informações como as supracitadas, de forma que se realize um mapeamento do fluxo integral da produção e medidas de melhorias possam ser formuladas a partir da realidade da organização, em direção a uma produção mais verde.

Wang *et al.* (2016) evidenciam dois aspectos sobre a insustentabilidade do paradigma industrial atual. Como primeiro aspecto, os autores expõem os níveis de impacto da produção industrial no meio ambiente, fato que contribui severamente com o aquecimento global e com o aumento da poluição ambiental. Além disso, Wang *et al.* (2016) apontam negativamente o consumo de derivados do petróleo e carvão, que compreendem recursos não renováveis, bem como o envelhecimento da população que oferta decrescentemente a força de trabalho. Estes são fatores que devem ser considerados para repensar sistemas operacionais de manufatura. Tecnologias emergentes representam oportunidades para viabilizar fábricas inteligentes, com sistemas mais eficientes em termos de consumo de recursos e responsabilidade ambiental.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0

Fábricas inteligentes, internet das coisas, sistemas físicos cibernéticos, computação em nuvem, dentre outras, são tecnologias que convergem e fundem o mundo físico, digital e

biológico. Zhong *et al.* (2017) discorrem sobre a operacionalização do conceito de Indústria 4.0, introduzindo a ideia de que a combinação entre tecnologias de sistemas de produção e processos de produção inteligentes compreende a base que facultará a transformação da cadeia de valor da indústria.

O referido termo Indústria 4.0 surgiu em 2011 na feira de Hannover, na Alemanha. O termo teve origem em um projeto estratégico de alta tecnologia do governo alemão, que pretendia promover a informatização da manufatura no país (LU, 2017). A indústria 4.0, em sua concepção, objetiva facilitar a adoção de práticas de manufatura inteligente, com a otimização do uso de recursos alocados na produção, a redução de desperdícios de insumos ao longo do processo, a redução de tempos médios de execução de atividades, a maior autonomia no gerenciamento de processos, bem como a previsibilidade de falhas de máquinas e adaptabilidade do arranjo produtivo frente às oscilações de demanda. A indústria 4.0 compreende mecanismos para atuação em um mercado dinâmico, global e reconfigurável (ZHONG *et al.*, 2017).

Lu (2017) complementa que a Indústria 4.0 tem como objetivo aumentar os níveis de eficiência e produtividade operacional por meio da associação de recursos como: digitalização de processos; automação e adaptação; interação homem-máquina (IHM); serviços e negócios de valor agregado e comunicação automática de dados.

Sob outro ponto de vista, Lasi *et al.* (2014) discorrem sobre conceitos e interpretações do termo Indústria 4.0, referenciando-o às necessidades de mudanças sociais, econômicas e políticas, e principalmente à mudança do paradigma de produção industrial tradicional que, habitualmente, almeja a produção em massa de produtos. Wang *et al.* (2016) e Zhong *et al.* (2017) citam que os usuários finais têm exigido continuamente produtos altamente personalizados em pequenos lotes, facultando um repensar da lógica de produção vigente.

A Indústria 4.0 desponta como um modelo relativo à produção de pequenos lotes, individualizados, personalizados conforme a necessidade do consumidor. Ao comparar um modelo de produção da indústria tradicional com uma indústria nos moldes da Indústria 4.0, faz-se necessário evidenciar que o fato de a indústria produzir, seguindo a lógica proposta pela indústria 4.0 (lotes personalizados), não indica necessariamente que a atividade não manterá a condição econômica próspera, comumente atrelada à produção em massa. Supõe-se que a produção em lote 1 manterá a condição econômica (LASI *et al.*, 2014). Corroborando o exposto, Lu (2017) e Zhong *et al.* (2017) referem que o princípio da

Indústria 4.0 é fornecer flexibilidade, descentralização, redução nos prazos de entrega, personalização nos lotes e, por conseguinte, redução nos custos operacionais.

Conforme Lasi *et al.* (2014), as mudanças necessárias para a implementação da Indústria 4.0 são, em geral, orientadas pela tecnologia da informação, como: ciclos de desenvolvimento menores; produção em lote único, em um cenário onde a produção é puxada e não empurrada (OLHAGER; OSTLUND, 1990); maior flexibilidade no processo de desenvolvimento. São necessárias, eventualmente, mudanças na estrutura física para a produção de lotes únicos. A descentralização de hierarquia em determinados casos pode ser requerida, a fim de tornar mais ágil o processo de tomada de decisões.

A tecnologia contribui na concepção de células de fabricação autônomas, as quais podem exercer controle sobre o próprio processo e otimizar as etapas de fabricação, minimizando eventuais desperdícios de recursos que possam ocorrer (LASI *et al.*, 2014).

Para Lasi *et al.* (2014), a implantação desses sistemas dinâmicos e integrados pode caracterizar uma tarefa desafiadora, no entanto uma oportunidade de ganho de competitividade no mercado. Para Stock e Seliger (2016), o paradigma da Indústria 4.0 é essencialmente delineado por três dimensões: (1) integração horizontal através da toda a rede de criação de valor, (2) engenharia de ponta a ponta durante todo o ciclo de vida do produto, bem como (3) sistemas de integração e manufatura em rede.

A Indústria 4.0 está diretamente relacionada à internet das coisas, sistemas físicos cibernéticos, tecnologias e segurança da informação, realidade aumentada, Big Data, robôs autônomos, manufatura aditiva (impressão 3D), simulação e computação em nuvem.

Xu, Xu e Li (2018) consideram os sistemas físicos cibernéticos como a base principal da Indústria 4.0. Conforme conceituam os referidos autores, componentes de hardware e software operam colaborativamente em diferentes escalas espaciais e temporais e de forma interligada.

Lu (2017) descreve como sistemas físicos cibernéticos a convergência dos mundos físico e digital, correspondente a uma intensa conexão entre as operações que acontecem no mundo físico e os dados que são gerados no mundo digital, instantaneamente. O sistema físico cibernético capta dados do sistema físico por meio de computadores embutidos, aplicativos sem fio integrados às máquinas, sensores e atuadores que enviam informações que abastecem os servidores (LEE; BAGHERI; KAO, 2015; LU, 2017). Tais servidores, providos de inteligência artificial, aprendem com os dados e fornecem informações para tomada de decisão (IHM). Dessa forma, a coordenação das atividades pode se dar por meio da interação com os dados gerados pelo sistema físico cibernético.

A união entre sistemas físicos (máquinas, transportadores e produtos) e sistemas de informação geram dados chamados de Big Data (LEE; BAGHERI; KAO, 2015; WANG *et al.*, 2016) que, ao serem processados, podem retornar comandos específicos para as máquinas, possibilitando um processo de aprendizagem.

Análises avançadas de informação permitem que as máquinas interconectadas em rede possam ter um melhor desempenho, aumentando a confiabilidade e a qualidade do produto. Lee, Bagheri e Kao (2015) conceituam os sistemas físicos cibernéticos como tecnologias que permitem o gerenciamento de sistemas do chão de fábrica aos dados em nuvem.

Lee, Bagheri e Kao (2015) descrevem dois componentes principais de um sistema físico cibernético, a saber: (1) a conectividade avançada que assegura a coleta de dados em tempo real de sistemas físicos e retorna informações, (2) o gerenciamento de dados e a capacidade computacional que constrói o espaço cibernético.

Dados são obtidos das máquinas, por meio de sensores adequados ao tipo de dados que se deseja coletar. Após a coleta de dados, tais dados são convertidos em informações, os algoritmos e aplicativos específicos contribuem para a conversão neste processo. Em nível cibernético, essas informações servem de parâmetro para compreender os status de máquinas, individualmente. Essas análises, conforme sugerem Lee, Bagheri e Kao (2015), representam medidas para comparação de desempenho entre máquinas, medidas para autocomparação de desempenho com dados antigos da máquina e também previsão de comportamento futuro, baseado em histórico. Este conjunto de informações, geradas por meio do sistema físico cibernético, ampara decisões mais precisas para otimizar o processo de manutenção, por exemplo.

Zhong *et al.* (2017) conceituam a manufatura inteligente como um modelo operacional que visa otimizar a produção, baseando-se em ciência e tecnologia para melhoria de design de produto, processo de desenvolvimento, bem como integrar todo o ciclo de vida de um determinado produto. Conforme evidenciam os autores, a adoção do modelo de manufatura inteligente agrega em eficiência de produção, qualidade final do produto bem como assegura a competitividade da empresa, visto que amplia a capacidade adaptativa a mercados dinâmicos.

Em um ambiente de manufatura inteligente habilitada para atuação com Internet das Coisas (IoT), pressupõe-se que ocorram interações homem-homem, homem-máquina e máquina-máquina. A coleta de dados ocorre em tempo real por meio de dispositivos interconectados em rede (ZHONG *et al.*, 2017).

A IoT refere-se à interconexão digital de dispositivos com a internet. Xu, Xu e Li (2018) descrevem três camadas no ambiente de Internet das Coisas, sendo elas: camada de plataforma, camada de aplicação e camada de soluções da indústria. A camada da plataforma IoT conecta dispositivos para receber e transmitir dados e também transmite informações dos dispositivos para a camada de aplicativo. A camada de aplicação avalia o status do equipamento e integra a IoT com técnicas de processamento cognitivo, como: análise de dados, automação e aprendizado de máquina para avaliar os fatores dinâmicos que contribuem para a produção. A tomada de decisão é impulsionada pela análise dos dados coletados e processados através da rede IoT. A camada de soluções do setor adiciona o conhecimento do domínio à camada de aplicativo.

Como exemplo, Xu, Xu e Li (2018) citam uma empresa de produção de cimento que aplicou a tecnologia IoT com algoritmos avançados de aprendizado de máquina para estimar a tendência de consumo de energia. Conforme os resultados evidenciados, o aplicativo otimizou o consumo de energia da empresa, reduzindo em 10% o consumo. Xu, Xu e Li (2018) acrescentam que a IoT também é conhecida como computação onipresente, inteligência ambiental ou ainda, eletrônica distribuída.

O RFID (identificação por radiofrequência) é um dos pilares da IoT. Desde a década de 1980, o RFID tem sido utilizado para identificar e rastrear objetos. Possui aplicabilidade em diversos setores, incluindo manufatura.

Em sua concepção, o RFID é uma tecnologia que utiliza comunicação sem fio. Embora esta tecnologia tenha sido desenvolvida inicialmente para fins de rastreamento e identificação, atualmente tem atendido outras aplicações, o que levou ao desenvolvimento de uma nova gama de sensores sem fio baseados em RFID (XU; XU; LI, 2018).

Sintetizando a relação entre este arcabouço de tecnologias, Lu (2017) menciona o conceito de interoperabilidade da Indústria 4.0, referindo-se à operação em rede, em que é possível 2 ou mais sistemas se comunicarem e utilizarem funcionalidades, um de outro. A interoperabilidade da indústria 4.0 pode conceber a síntese de softwares, promovendo soluções para o contexto empresarial.

Conforme Lu (2017), os princípios da interoperabilidade são: acessibilidade, multilinguismo, segurança, privacidade, subsidiariedade, uso de padrões abertos, software de código aberto e soluções multilaterais.

No entanto, nota-se que ainda há incertezas e inseguranças no tocante à adoção de um sistema baseado em indústria 4.0. Como exemplo, o impacto no número de empregos ainda é um fator que gera polêmica no contexto da indústria 4.0, visto que a administração

das tecnologias exige mais qualificações e competências do que o método tradicional / manual de produzir (LU, 2017). Conforme sugere Tsai (2018), evidencia-se como limitador no avanço da adoção de tecnologias concernentes à Indústria 4.0, a insegurança no tocante ao retorno do investimento financeiro que, na maioria das organizações, é o mais importante. No entanto, a subjetividade em mensurar os resultados, em geral, se atribui à falta de um procedimento predefinido (TSAI, 2018).

Ao analisar o desenvolvimento da indústria desde a primeira revolução industrial até a atualidade, percebe-se uma significativa mudança em termos de estrutura de organização, modelos de gestão, modelos de produção, logística, distribuição, consumo, até mesmo o acesso à informação por parte dos consumidores. É importante realizar uma análise considerando todos os aspectos que envolvem a relação produção e consumo, para compreender que a evolução das tecnologias está emaranhada a esse ecossistema e contribui em diversos aspectos.

Entende-se que as tecnologias diretamente relacionadas ao conceito de indústria 4.0 elevam os moldes de produção tradicional para outro patamar. Tanto em termos de software, quanto de hardware, os ganhos são notáveis, conforme evidenciado, visto que fornecem um processamento de dados que garantem tomadas de decisões mais assertivas. A indústria 4.0 enquanto conceito, busca estabelecer melhores relações entre parceiros, visando otimizar recursos, competências e conhecimento para desenvolver produtos melhores e economicamente mais eficientes.

Considerando o período presente, em que o cenário pandêmico acomete todas as organizações, do pequeno ao grande porte e de forma interfronteiriça, percebeu-se que as organizações notadamente mais flexíveis e adaptáveis são as que conseguiram superar as dificuldades deliberadamente impostas. Ao refletir sobre tais constatações, pode-se sugerir que uma empresa habilitada com tecnologias da indústria 4.0, com mais flexibilidade de produção, tende a ter resultados melhores que uma empresa em moldes da indústria tradicional, em que não tem margem para adaptações a cenários incomuns ou inesperados.

A sustentabilidade tem se apresentado como pilar estratégico para empresas que buscam diferenciação no mercado. Nesse contexto, a Manufatura Verde objetiva reduzir os impactos ambientais, por meio de processos mais eficientes em termos de consumo de recursos e energia. Contribuindo neste aspecto, as tecnologias da Indústria 4.0 subsidiam os ganhos de eficiência requeridos, ao automatizar e modernizar equipamentos, adotando energia limpa, tornando a produção mais enxuta e maximizando resultados. Cabe salientar que a Indústria 4.0 atua alinhada com a necessidade de equilíbrio entre produção industrial e

aspectos de sustentabilidade. Com o uso dos recursos tecnológicos para tornar a cadeia produtiva mais integrada, faculta uma produção mais ágil, inteligente e consciente. Os ganhos de produtividade estão diretamente relacionados à redução dos impactos da indústria no meio ambiente, principalmente no tocante à redução de desperdícios e otimização de uso dos recursos.

No entanto, nota-se que a adoção de tais tecnologias ainda se concentra, principalmente, em grandes empresas, as quais dispõem de mais recursos financeiros, estrutura e conhecimento. O custo da adoção das tecnologias e das adaptações que se fazem necessárias ainda representa um obstáculo para muitas empresas, assim como o receio quanto ao retorno do investimento também é um aspecto evidenciado. Nesse sentido, percebendo tais circunstâncias, algumas instituições que estão à frente na pesquisa e desenvolvimento destas tecnologias, bem como atuam como agenciadores entre fornecedores e consumidores de tais tecnologias, dispõem esforços em realizar um trabalho de disseminação do conhecimento e de demonstrações práticas das tecnologias para tornar o acesso e a compreensão facilitados. Dessa forma, facultar-se-á o crescimento da adoção da indústria 4.0 em mais empresas, abarcando as de médio e pequeno porte.

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os danos ambientais causados direta e indiretamente pelas atividades industriais são problemas constatados e relatados em relatórios internacionais. Os órgãos reguladores têm direcionado esforços em criar normas que orientem as empresas a atuar adequadamente para mitigar tais danos. Neste sentido, as tecnologias desenvolvidas avançam, permitindo maior controle e monitoramento da cadeia produtiva, inclusive facultando cenários flexíveis de produção em períodos de sazonalidades.

A indústria 4.0 representa um marco importante no avanço da indústria, contribuindo com ferramentas tecnológicas de suporte e permitindo desde pequenos incrementos até grandes mudanças nos arranjos industriais. Os benefícios da adoção de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 são diversos, além de permitir atender aos pilares fundamentais da sustentabilidade que são: econômico, social e ambiental.

O meio ambiente se beneficia e conseqüentemente a sociedade, quando medidas de Manufatura Verde são incorporadas às estratégias organizacionais, que inovam produzindo de forma mais eficiente e ecologicamente correta. Entende-se que à medida que aumenta a maturidade tecnológica das empresas, bem como se desenvolvem as referidas tecnologias,

tornando-as mais acessíveis, incrementa-se a adoção destas tecnologias que consequentemente contribuem com o avanço sustentável da indústria.

Dessa forma, sugere-se que pesquisas futuras que relacionem a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 com aspectos de Manufatura Verde, tendem a contribuir com o cenário corporativo e beneficiar amplamente a sociedade em direção ao equilíbrio das esferas: econômica, social e ambiental.

## REFERÊNCIAS

AFUM, E. *et al.* Green manufacturing practices and sustainable performance among Ghanaian manufacturing SMEs: The explanatory link of green supply chain integration. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001**. Sistemas de Gestão Ambiental-Requisitos com orientações para uso. 2015.

BAINES, T. *et al.* Examining green production and its role within the competitive strategy of manufacturers. **Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 5, n. 1, p. 53, 2012.

BARRETO, L., AMARAL, A., PEREIRA, T. Industry 4.0 implications in logistics: an overview. **Procedia Manuf.** 13, 1245–1252, 2017.

DALENOGARE, L. S., BENITEZ, G. B., AYALA, N. F., FRANK, A.G. The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. **Int. J. Prod. Econ.** 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>

DEIF, A. M. A System Model for Green Manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 14, p. 1553-1559, 2011.

FATORACHIAN, H., KAZEMI, H., 2018. A critical investigation of Industry 4.0 in manufacturing: theoretical operationalisation framework. **Prod. Plan. Control**, 29, 633e644. <https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1424960>.

FETTERMANN, D. C *et al.* How does Industry 4.0 contribute to operations management? **J. Ind. Prod. Eng.**, 35 (4), 255–268. 2018

HOFMANN, E., RÜSCH, M. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. **Comput. Ind.** 89, 23–34. 2017

LASI, H *et al.* Industry 4.0. **Business & information systems engineering**, v. 6, n. 4, p. 239-242, 2014.

LEE, J; BAGHERI, B; KAO, H-A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18-23, 2015.

LI, L. China's manufacturing locus in 2025: with a comparison of "Made-in-China 2025" and "Industry 4.0". **Technol. Forecast. Soc. Chang.** 2017

LU, Y. Industry 4.0: a survey on technologies, applications and open research issues. **J. Ind. Inf. Integrat.** 6, 1–10. 2017.

LU, Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 6, p. 1-10, 2017.

MOEUF, A *et al.* The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. **Int. J. Prod. Res.** 56, 1118e1136. 2018. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1372647>.

OLHAGER, J; ÖSTLUND, B. An integrated push-pull manufacturing strategy. **European Journal of Operational Research**, v. 45, n. 2-3, p. 135-142, 1990.

OLIVEIRA NETO, G. C. *et al.* Princípios e ferramentas da produção mais limpa: um estudo exploratório em empresas brasileiras. **Gestão & Produção**, v. 22, n. 2, p. 326-344, 2015.

PANG, R; ZHANG, X. Achieving environmental sustainability in manufacture: A 28-year bibliometric cartography of green manufacturing research. **Journal of cleaner production**, v. 233, p. 84-99, 2019.

REDCLIFT, M. Sustainable development (1987–2005): an oxymoron comes of age. **Sustainable development**, v. 13, n. 4, p. 212-227, 2005.

RIEGEL, I. C; STAUDT, D; DAROIT, D. Identificação de aspectos ambientais relacionados à produção de embalagens de perfumaria: contribuição para projetos sustentáveis. **Gestão & Produção**, v. 19, n. 3, p. 633-645, 2012.

SILVA, D. A. L; SILVA, E. J; OMETTO, A. R. Green Manufacturing: uma análise da produção científica e de tendências para o futuro. **Production**, v. 26, n. 3, p. 642-655, 2016.

STOCK, T; SELIGER, G. Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. **Procedia Cirp**, v. 40, p. 536-541, 2016.

TOKE, L. K.; KALPANDE, Shyamkumar D. Critical success factors of green manufacturing for achieving sustainability in Indian context. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 12, n. 6, p. 415-422, 2019.

TRSTENJAK, M., COSIC, P. Process planning in industry 4.0 environment. **Procedia Manuf.** 11, 1744e1750 (Elsevier). 2017

TSAI, Wen-Hsien. Green production planning and control for the textile industry by using mathematical programming and industry 4.0 techniques. **Energies**, v. 11, n. 8, p. 2072, 2018.

TSAI, Wen-Hsien; LAI, Shang-Yu. Green Production Planning and Control Model with ABC under Industry 4.0 for the Paper Industry. **Sustainability**, v. 10, n. 8, p. 2932, 2018.

WANG, S *et al.* Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data-based feedback and coordination. **Computer Networks**, v. 101, p. 158-168, 2016.

XU, L. D., XU, E. L., LI, L. Industry 4.0: state of the art and future trends. **Int. J. Prod. Res.** 56 (8), 2941–2962. 2018

XU, L. D; XU, Eric L.; LI, L. Industry 4.0: state of the art and future trends. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 8, p. 2941-2962, 2018.

YANG, C-C; YANG, K-J; PENG, S-Y. Exploration strategies and key activities for the system of environmental management. **Total Quality Management & Business Excellence**, v. 22, n. 11, p. 1179-1194, 2011.

ZHONG, R. Y., XU, X., KLOTZ, E., NEWMAN, S. T. **Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review.** *Engineering* 3, 616e630. 2017. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>.

ZHONG, R. Y. *et al.* Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. **Engineering**, v. 3, n. 5, p. 616-630, 2017.

**Como Referenciar este Artigo, conforme ABNT:**

SCHREIBER, D; HAUBERT, B. A Adoção de Tecnologias da Indústria 4.0 para Fomentar Práticas de Manufatura Verde. **Rev. FSA**, Teresina, v. 20, n. 11, art. 1, p. 3-18, nov. 2023.

| Contribuição dos Autores                                     | D. Schreiber | B. Haubert |
|--|--------------|------------|
| 1) concepção e planejamento.                                 | X            | X          |
| 2) análise e interpretação dos dados.                        | X            | X          |
| 3) elaboração do rascunho ou na revisão crítica do conteúdo. | X            |            |
| 4) participação na aprovação da versão final do manuscrito.  | X            | X          |