

19 a 21 de outubro Ponta Grossa - PR - Brasil

PROCESSOS SUSTENTÁVEIS E INDÚSTRIA 4.0: DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA A TRANSFORMAÇÃO DIGITAL

SUSTAINABLE PROCESSES AND INDUSTRY 4.0: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR DIGITAL TRANSFORMATION

ÁREA TEMÁTICA: INOVAÇÃO, TECNOLOGIA E EMPREENDEDORISMO

Michele Kremer Sott, Universidade de Santa Cruz do Sul, Brasil, sott.mk@gmail.com

Leonardo B. Furstenu, Universidade de Santa Cruz do Sul, Brasil, leonardofurstenu@mx2.unisc.br

Mariluz Sott Bender, Universidade de Santa Cruz do Sul, Brasil, maribendersott@hotmail.com

Janaína Lopes Dias, Universidade de Santa Cruz do Sul, Brasil, janainalopesdias1@gmail.com

Resumo

A sustentabilidade e a quarta revolução industrial são desafios inerentes para organizações de todo o mundo, e estão transformando os modelos de negócios, os produtos, serviços e processos organizacionais através da integração de tecnologias emergentes e processos sustentáveis. Deste modo, este trabalho tem como objetivo desenvolver o diagrama estratégico do campo de estudo e identificar os temas estratégicos para a área. Para isso, foi utilizado o software SciMAT (*Science Mapping Analysis Software Tool*) para identificação dos temas mais importantes relacionados a processos sustentáveis e indústria 4.0, a fim de melhorar a compreensão de como as tecnologias e processos podem ser integrados para alcançar o tripé do desenvolvimento sustentável gerando benefícios ambientais, sociais e econômicos. Os resultados apontam poucos trabalhos que discutem a integração entre tecnologias e processos sustentáveis, e elenca os principais desafios e oportunidades na área. Dentre os temas mais discutidos estão sustentabilidade, performance ambiental, produção mais limpa e tecnologias como Internet das Coisas e impressões 3D, entre outras. Espera-se que esta análise de inteligência estratégica proporcione uma visão holística do campo de estudo e que possa auxiliar pesquisadores e organizações no entendimento do tema e em abordagens futuras em prol do desenvolvimento de negócios sustentáveis.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Processos sustentáveis; Processos verdes; Indústria 4.0; Transformação digital.

Abstract

Sustainability and the fourth industrial revolution are inherent challenges for organizations worldwide and are transforming business models, products, services and organizational processes by integration of emerging technologies and sustainable processes. With this perspective in mind, our goal was to depict the strategic diagram of the field of study and identify the strategic themes of the area. To do this, the SciMAT (*Science Mapping Analysis Software Tool*) was used to identify the most important themes related to sustainable processes and industry 4.0, in order to enhance the understanding of how technologies and processes can be integrated to reach the tripod of sustainable development generating environmental, social and economic benefits. The results show few studies that discuss the integration between sustainable technologies and processes, and list the main challenges and opportunities related to the area. Among the most discussed topics are sustainability, environmental performance, cleaner production and technologies such as Internet of Things and 3D printing, among others. We hope this strategic intelligence analysis may provide a holistic view of the field of study and can assist researchers and organizations in understanding the topic and in future approaches for the development of sustainable business.

Keywords: Sustainability; Sustainable processes; Green processes; Industry 4.0; Digital transformation.

1. INTRODUÇÃO

O conceito de indústria 4.0, também conhecida como quarta revolução industrial, surgiu em 2011 como uma estratégia tecnológica para melhorar a performance organizacional, e tem transformado processos de organizações de todos os setores através da adoção de tecnologias emergentes que auxiliam na digitalização e automação de processos, na gestão de grandes volumes de dados, e na integração de informações e análises preditivas (López-Robles et al., 2020). Tais tecnologias fornecem informações em tempo real e facilitam a tomada de decisão, uma vez que esta passa a ser apoiada por resultados da análise de grandes volumes de dados que podem auxiliar na identificação de problemas e em alterações processuais que aumentem a flexibilidade e a eficiência organizacional (Furstenau et al., 2020a). Deste modo, as tecnologias emergentes transcendem a gestão tradicional em direção a novas estratégias para produzir e entregar produtos e serviços (Sott, 2016), criando uma cadeia de valor inteligente para integração entre organização e *stakeholders* (Schumacher et al., 2016).

Em cenários altamente tecnológicos advindos da indústria 4.0, é crescente a preocupação com o impacto que os novos processos e tecnologias causarão nos pilares ambiental, econômico e social da sustentabilidade (Furstenau et al., 2020b), principalmente porque em um primeiro momento houveram poucas comprovações acerca dos efeitos positivos da adoção tecnológica na produtividade organizacional. Deste modo, diversos autores estudam as relações entre sustentabilidade e indústria 4.0. Sony e Naik (2020), por exemplo, afirmam que integrar ações sustentáveis e tecnologias emergentes é um dos maiores desafios para a transformação digital das organizações. Enquanto outros autores defendem que a indústria 4.0 pode ser a solução para o desenvolvimento de processos sustentáveis e criação de uma cadeia de valor integrada que incentive proteção ambiental e social (Luthra e Mangla, 2018).

Os processos sustentáveis, também chamados de processos verdes ou produção verde, representam a transformação das atividades organizacionais em direção a formas sustentáveis de produção, capazes de assegurar proteção ambiental, econômica e social (Tsai, 2018), uma vez que todo processo necessita de investimento econômico, recursos de transformação e mão de obra através da habilidade humana. Além disso, o mercado consumidor tem exigido cada vez mais práticas sustentáveis, e novas legislações comprovam a crescente preocupação com o tema (Sun et al., 2020). Estas transformações do mercado fazem as organizações investirem continuamente em projetos que transformem sua forma de produzir através de processos sustentáveis, a fim de reduzir o consumo de recursos como água e energia, e o nível de emissões e resíduos do processo produtivo (Cherrafi et al., 2017). Deste modo, a integração entre tecnologias emergentes e processos sustentáveis é uma estratégia necessária para assegurar a competitividade organizacional sem comprometer a sociedade e o meio ambiente (Liu e De Giovanni, 2019).

Dada a importância do desenvolvimento de processos de produção sustentáveis e o potencial das tecnologias emergentes para promoção da sustentabilidade, este trabalho apresenta os temas estratégicos relacionados ao campo de estudo. A pesquisa foi realizada através de documentos disponíveis na base de dados Scopus. Além disso, o estudo foi realizado com apoio do software SciMAT (*Science Mapping Analysis Software Tool*) desenvolvido por Cobo et al. (2012) para geração de um diagrama estratégico do campo de estudo. Deste modo, foi possível identificar os temas mais discutidos na relação entre processos sustentáveis e indústria 4.0, e os principais desafios e oportunidades na área.

Este estudo está dividido em seções: a seção 2 apresenta o referencial. A seção 3 dispõe dos materiais e métodos que nortearam esta pesquisa. Os resultados e discussões são apresentados na seção 4 e, por fim, a seção 5 contempla as conclusões, limitações e sugestões de trabalhos futuros relacionados ao campo de estudo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Indústria 4.0

Enquanto na terceira revolução industrial as organizações buscavam simplificar e automatizar seus processos, na quarta revolução industrial as empresas transformam todos os processos relacionados à organização em uma cadeia de valor integrada (Oesterreich e Teuteberg, 2016). Esta cadeia de valor integra organização, clientes e fornecedores através de tecnologias da informação e comunicação para auxiliar na automação de processos e controle de dados de produção, além de apoiar a otimização de processos para redução de desperdícios (Nascimento et al., 2019). Deste modo, as tecnologias da indústria 4.0 oferecem uma série de alternativas e benefícios para flexibilizar e otimizar os processos produtivos, além de monitorá-los em tempo real e aumentar a eficiência organizacional através da análise de grandes volumes de dados (Ivanov et al., 2016).

Estes avanços tecnológicos estão transformando o mercado de trabalho, que passa a exigir novas habilidades e qualificar seus funcionários para atenderem as demandas relacionadas as tecnologias (Maresova et al., 2018), desencadeando um desafio para integração entre trabalhadores e sistemas cyber-físicos. Apesar da necessidade de treinar pessoas para tarefas orientadas a dados, a inclusão de tecnologias facilita a gestão e o controle das variáveis ambientais. Estas mudanças não somente transformam os processos, produtos e serviços organizacionais em direção a produtividade, mas também permitem interconectar sistemas organizacionais em prol da proteção ambiental. Muitas tecnologias da indústria 4.0 possuem potencial para redução do impacto ambiental, uma vez que auxiliam na gestão adequada do consumo de recursos como água e energia (Ford e Despeisse, 2016), cuja redução também impacta diretamente no pilar econômico da organização. Além disso, o uso de tecnologias emergentes permite a integração de informações, máquina e pessoas com maior facilidade, eliminando tarefas repetitivas e alocando pessoas a trabalhos estratégicos e de análise de dados (Lee et al., 2015).

2.2 Processos sustentáveis

Processos podem ser definidos como uma série de atividades a serem executadas em uma ordem pré-determinada para atingir determinado objetivo organizacional (Furstenau et al., 2019b). Neste sentido, os processos podem ser considerados sustentáveis quando atendem os três pilares do *Triple Bottom Line (TBL)*, ou seja, não apenas a dimensão ambiental, mas também a social e a econômica (Ivascu, 2020), permitindo que organizações lucrem ao mesmo tempo que contribuem para o desenvolvimento da sociedade e preservação do meio ambiente. O desenvolvimento sustentável tem gerado uma série de desafios e oportunidades, fazendo com que organizações de todo o mundo transformem seus princípios e objetivos através da adoção de práticas sustentáveis, técnicas e tecnologias que auxiliam o desenvolvimento e gestão de processos sustentáveis (Ivascu, 2020). Neste contexto, a relação entre processos e indústria 4.0 impacta diferentes níveis e operações organizacionais, desde a estratégia empresarial, até a margem de lucro, competitividade, recursos humanos e atividades processuais (Nwaiwu et al., 2020).

O aperfeiçoamento dos processos organizacionais para atender as necessidades dos clientes é inerente a todas as organizações que desejam manter sua competitividade e lucratividade (Furstenau et al., 2019a). Deste modo, a globalização e as constantes mutações nas exigências dos clientes transformam os processos organizacionais para adoção de estratégias de negócio que auxiliem na projeção, desenvolvimento e entrega de produtos que atendam as necessidades dos consumidores (Sott, 2016). Tal transformação do mercado consumidor instiga a adoção de novas medidas para gestão de processos de negócios. Já em 1999, Bourdeau apresentou a

evolução das preocupações relacionadas a sustentabilidade e novas abordagens que passaram a ser necessárias ao longo do tempo. A Figura 1 apresenta a evolução do triângulo da sustentabilidade proposto por Bourdeau (1999), inicialmente para o setor de construção e posteriormente expandido para outros setores.

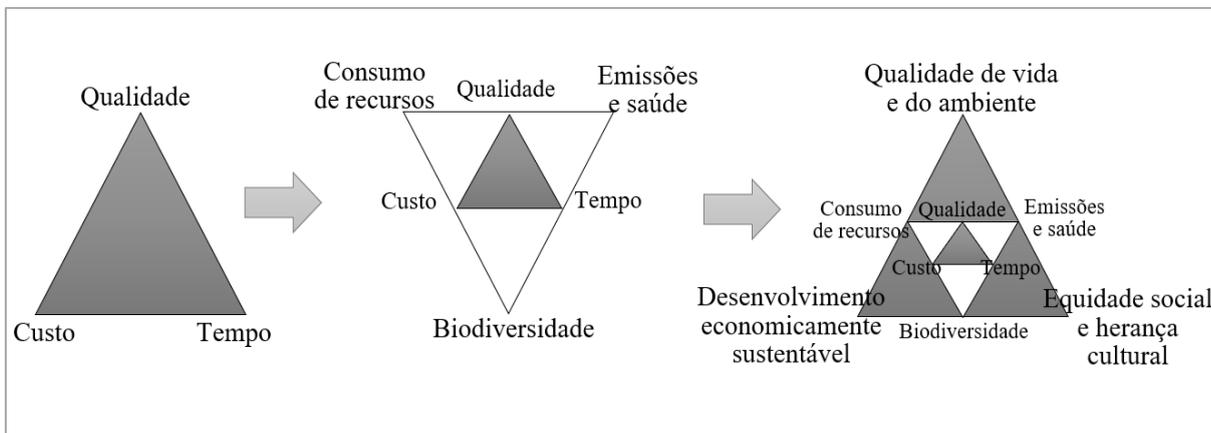


Figura 1 – Evolução das preocupações relacionadas a processos sustentáveis (Adaptado de Bourdeau (1999)).

Na primeira fusão são apresentados apenas fatores de competitividade tradicionais relacionados a custo, qualidade e tempo. Na segunda estrutura, novos fatores aparecem relacionados a sustentabilidade do ambiente, como consumo de recursos, emissões e saúde, e biodiversidade. Por fim, na terceira estrutura são incorporados fatores relacionados ao contexto global para desenvolvimento de produtos e processos sustentáveis, como qualidade de vida e do ambiente, desenvolvimento economicamente sustentável, equidade social e herança cultural (Bourdeau, 1999).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização deste estudo foram considerados documentos da base de dados (BD) Scopus, por se tratar de uma base de dados internacional indexada e com grande volume de pesquisas de qualidade. Os termos de busca, os operadores booleanos (Oper.) e a *string* utilizada na pesquisa são apresentados na Tabela 1. Além disso, foram utilizados critérios de inclusão de documentos, sendo considerados apenas documentos com os termos de busca presentes no título, resumo ou palavras-chaves, em inglês ou português, publicados até a data de coleta dos dados (27/08/2020).

Termos de busca	Oper.	String de busca	BD
sustainable process, green process, green production, industry 4.0, digital transformation, smart manufacturing, digital manufacturing, smart production, smart factory, intelligent factories, the fourth industrial revolution, the 4th industrial revolution, smart factories.	AND-OR	((("sustainable process" OR "green process" OR "green production") AND ("industry 4.0" OR "digital transformation" OR "smart manufacturing" OR "digital manufacturing" OR "smart production" OR "smart factory" OR "intelligent factories" OR "the fourth industrial revolution" OR "the 4th industrial revolution" OR "smart factories"))	Scopus

Tabela 1 – Termos e *string* de busca.

Depois de coletados, os documentos relacionados ao campo de estudo foram inseridos no software SciMAT para as etapas de processamento e análise de dados. Na etapa de pré-processamento os documentos duplicados foram removidos e as palavras-chaves com o mesmo

significado foram agrupadas, como ‘3-D-printing’ e ‘3D-printing’, e ‘Internet-of-Things’ e ‘IoT’, entre outras. Em seguida, todos os documentos e palavras-chaves foram inseridos em um único período para geração do diagrama estratégico e identificação dos temas mais importantes do campo de estudo.

Uma vez realizado o pré-tratamento dos dados, estes foram incluídos para a geração e análises dos resultados. Nesta etapa considerou-se coocorrência de palavras-chaves, a fim de identificar e clusterizar os termos que mais aparecem nos trabalhos relacionados ao campo de estudo. Para normalização estatística dos dados foi utilizado o índice de equivalência, e o algoritmo de centros simples foi empregado para criar a rede de termos com base no cálculo de coocorrências (Furstenau et al., 2020b; López-Robles et al., 2020; Sott et al., 2020). Deste modo foi possível gerar o diagrama estratégico a partir dos termos mais importantes do campo de estudo. A Figura 2 apresenta os passos executados no mapeamento científico.

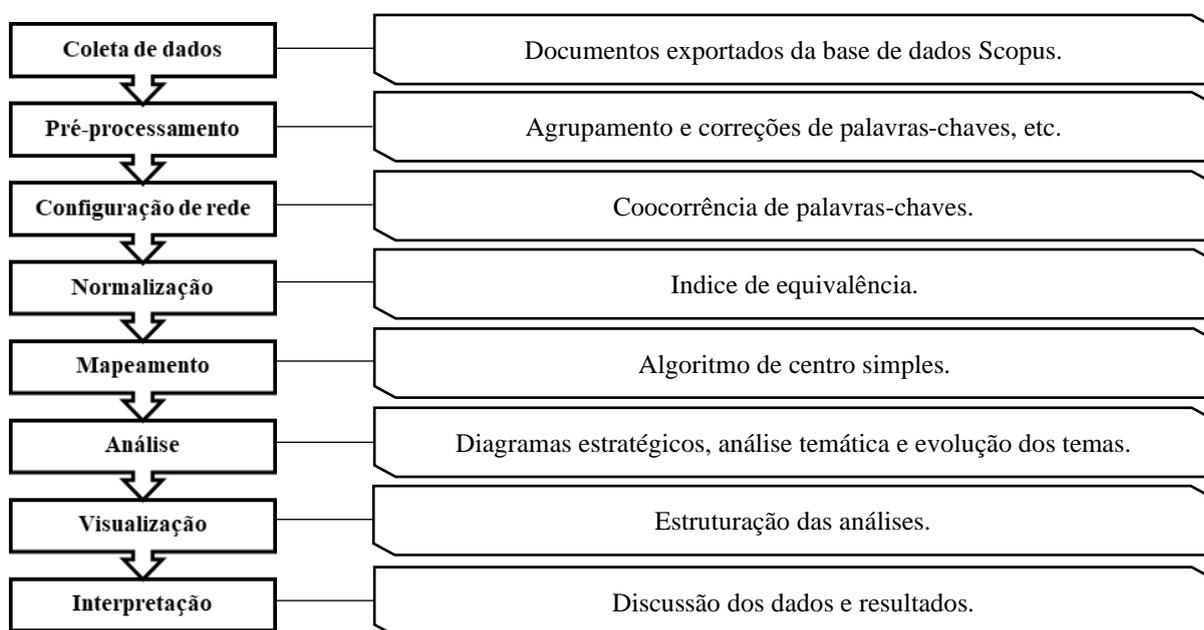


Figura 2 – Passos do mapeamento científico. (Adaptado de Furstenau et al. (2020) e Cobo et al. (2012)).

O diagrama estratégico consiste em um gráfico bidimensional composto por quatro quadrantes interceptados pelos eixos ‘x’ e ‘y’, que representam a centralidade e a densidade dos temas, respectivamente. Os quadrantes do diagrama representam a importância e o desenvolvimento dos temas para o campo de estudo, de acordo com o grau de centralidade e densidade de cada cluster. A Figura 3 exemplifica a distribuição do diagrama estratégico. O primeiro quadrante (Figura 3) (a) do diagrama é composto pelos temas motores, ou seja, aqueles com alta densidade e centralidade, caracterizando os temas mais desenvolvidos da área. O segundo quadrante (b) representa os temas básicos ou transversais, que possuem baixa densidade de ligações com outros temas, mas forte centralidade. Os temas emergentes ou declinantes compõem o terceiro quadrante (c), e seu baixo grau de desenvolvimento exige análise qualitativa para identificar se cada tema do quadrante está emergindo ou declinando no campo de estudo. Por fim, o quarto quadrante (d) representa os temas altamente desenvolvidos e isolados, ou seja, apesar de possuírem alta densidade nas relações, possuem poucas ligações com outros temas do campo de estudo (Furstenau et al., 2020b; Sott et al., 2020).

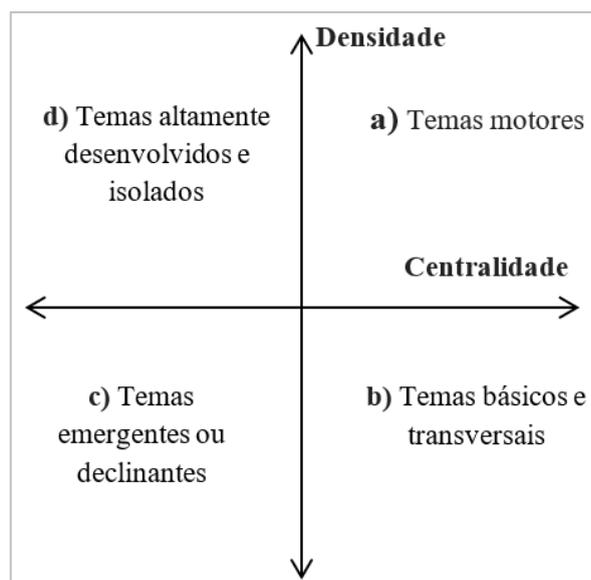


Figura 3 – Modelo do diagrama estratégico.

4. RESULTADOS

Embora tenham sido considerados documentos publicados em qualquer período, somente foram encontrados trabalhos relacionados ao campo de estudo a partir de 2016, evidenciando a emergência do tema e incipiência de discussões que relacionam processos sustentáveis e transformação digital. O baixo desenvolvimento de trabalhos relacionados reforça a necessidade de pesquisas na área e, para isso, o diagrama estratégico apresenta os temas mais importantes do campo de estudo.

4.1 Diagrama estratégico do campo de estudo

A partir da clusterização dos temas que coocorrem no campo de estudo, o diagrama estratégico apresenta a distribuição dos clusters em quatro quadrantes de acordo com o grau individual de desenvolvimento de cada tema. Através do diagrama estratégico (Figura 4) é possível identificar treze (13) clusters principais relacionados ao campo de estudo. Dentre os clusters plotados, cinco (5) representam clusters motores com alto grau de desenvolvimento; dois (2) representam temas básicos e transversais; quatro (4) representam temas emergentes ou declinantes e, por fim; dois (2) clusters se caracterizam como temas altamente desenvolvidos e isolados.

A presença de temas como ‘emissão de carbono’ e ‘imposto de carbono’ representa a preocupação relacionada ao grande volume de emissões derivadas dos processos industriais, que se caracterizam cada vez mais como um problema crescente a ser tratado pelas organizações. Estes clusters estão diretamente relacionados com os temas ‘produção mais limpa’ e ‘performance ambiental’, uma vez que novas políticas de proteção ao meio ambiente, apoiadas pela transformação do desejo de compra dos consumidores por produtos ambientalmente corretos, impactam diretamente nas estratégias empresariais em relação a seus processos de produção. Na mesma linha, o cluster ‘utilização da energia’ discute o consumo de energia nos diversos processos organizações, a necessidade energética em processos cada vez mais tecnológicos e o impacto deste elevado consumo no meio ambiente.

Por outro lado, o cluster ‘indústria automotiva’ representa a preocupação deste setor com processos sustentáveis. O setor automotivo foi um dos primeiros setores a adotar tecnologias emergentes da indústria 4.0, sendo o alto grau de implantação, gestão e integração tecnológica uma das razões para seus gestores buscarem a transformação de processos tradicionais em

processos sustentáveis, uma vez que pode ser mais fácil transformar processos quando estes já possuem sincronia com as tecnologias emergentes. Além disso, muitas pesquisas na área realizam a integração de tecnologias emergentes com outras técnicas e ferramentas de gestão como Custeio Baseado em Atividades (ABC) e Teoria das Restrições (TOC) para modelar e automatizar processos de maneira sustentável, maximizando o lucro, mas também contribuindo para o avanço ecológico e social (Tsai, 2018).

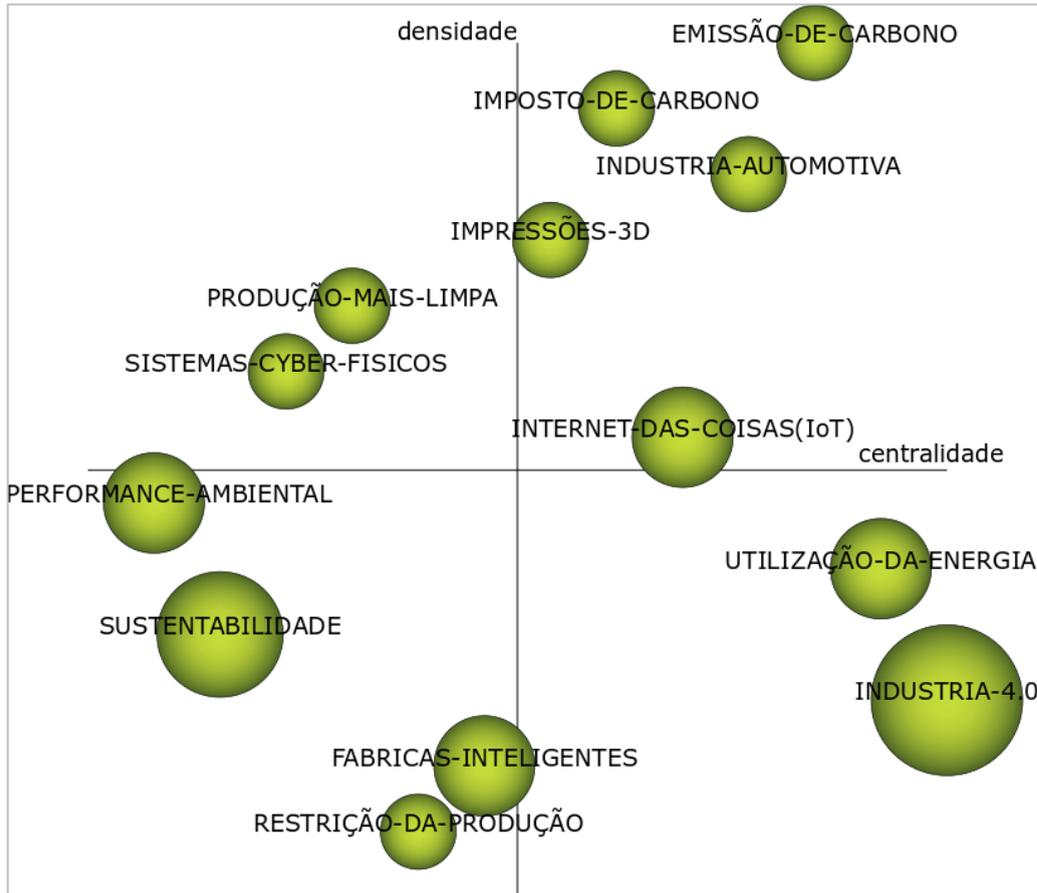


Figura 4 – Diagrama estratégico do campo de estudo. Fonte: SciMAT.

O cluster ‘restrição da produção’ por sua vez, discute as restrições dos processos produtivos quando inseridas políticas sustentáveis, uma vez que tais políticas transformam o negócio em prol de processos ambientalmente corretos. As pesquisas relacionadas a este cluster discutem formas de transformar os processos produtivos sem prejudicar economicamente a organização. Neste cenário, a adoção de tecnologias como robótica, veículos autônomos e impressões 3D permitem a transformação dos processos e a redução no uso de recursos, além de auxiliar na diminuição de emissões e desperdícios advindos dos processos produtivos (Liu e De Giovanni, 2019), e agindo efetivamente sobre o pilar ambiental da sustentabilidade (Huang et al., 2013). Estes fatores influenciam todos os pilares da sustentabilidade, uma vez que reduz a agressão ao meio ambiente e o custo de produção através da redução na geração de resíduos, estes fomentos no âmbito econômico e ambiental influenciam positivamente na demanda e no consumo dos clientes, transformando também a esfera social do desenvolvimento sustentável (Liu e De Giovanni, 2019).

Além disso, outros clusters apresentaram alto grau de desenvolvimento, principalmente relacionados a tecnologias emergentes como ‘sistemas cyber-físicos’, ‘impressões 3D’ e ‘Internet das Coisas’. O aparecimento de tais clusters evidencia que estas são as tecnologias

mais associadas a processos sustentáveis. Tal integração de tecnologias aos processos está diretamente relacionada a capacidade de automatização de processos, integração, armazenamento e monitoramento de dados, flexibilidade e agilidade nos processos produtivos. No entanto, o uso de tecnologias emergentes também apresenta potencial para auxiliar no desenvolvimento sustentável, uma vez que a análise de dados do processo pode auxiliar na melhor tomada de decisão para reduzir consumo e desperdícios, e transformar processos tradicionais em processos ambientalmente corretos. Ademais, os clusters ‘indústria 4.0’ e ‘sustentabilidade’ reforçam a preocupação relacionada a integração de processos sustentáveis e indústria 4.0, a fim de transformar fábricas tradicionais em fábricas do futuro, flexíveis, interconectadas e sustentáveis.

4.2 Principais desafios

Por um lado, os benefícios oriundos das tecnologias emergentes só podem ser atingidos através da perfeita integração entre processos, pessoas, recursos e gestão. Por outro lado, a transformação de processos tradicionais orientados para o lucro em processos inteligentes orientados ao desenvolvimento sustentável é um grande desafio para organizações de todos os setores. Desta forma, o desenvolvimento de processos interconectados com o ambiente altamente tecnológico é um grande desafio que, se bem gerido pode gerar consideráveis oportunidades para a adoção de medidas econômica, social e ambientalmente sustentáveis, evidenciando a necessidade das organizações adotarem práticas sustentáveis para alavancarem-se no mercado (Sheth et al., 2011).

Apesar das vantagens que as tecnologias da indústria 4.0 podem proporcionar para a transformação dos processos organizacionais, novos desafios surgem relacionados ao conhecimento tecnológico e habilidades humanas necessárias para a gestão de tecnologias e processos inteligentes. Para isso, as organizações enfrentam problemas relacionados ao surgimento de novas atividades e transformação dos processos organizacionais que exigem treinamento para execução de tarefas, análise de dados ou adequação a novos cargos organizacionais (Tsai, 2018). Embora novos tipos de empregos surgiram e devem seguir surgindo no contexto da indústria 4.0, a transformação da cultura organizacional e da mentalidade dos colaboradores no que tange a integração entre processos e tecnologias para a sustentabilidade é um desafio crescente para muitas organizações (Tsai, 2018).

Uma vez que a maior parte dos problemas ambientais são derivados de emissões de processos produtivos de indústrias e grandes corporações, o uso de tecnologias para transformação destes processos pode ser uma alternativa para lidar com a coleta de informações e otimização de recursos. No entanto, a tomada de decisão precisa contar com uma integração perfeita entre pessoas, máquinas e processos de produção (Tsai, 2018). Esta integração é um dos maiores desafios para as empresas do futuro, e deve ser explorado em maior profundidade através de trabalhos empíricos relacionados a integração entre processos sustentáveis e a adoção tecnológica.

4.3 Oportunidades

Neste cenário, a assertividade das organizações em relação a adoção de processos voltados as necessidades e expectativas de clientes em relação a produtos sustentáveis pode alavancar sua competitividade (Kumar et al., 2018). Neste sentido, organizações que tem como objetivo estratégico os desejos de seus consumidores, a redução de resíduos e a integração tecnológica para transformação de seus processos pode alcançar maior eficiência, espaço de mercado e contribuir para o desenvolvimento sustentável (Kipper et al., 2020).

Para que tecnologias possam ser utilizadas para a transformação dos processos organizacionais e de uma produção mais limpa, autores estão integrando diferentes filosofias de gestão que auxiliam na modelagem, adaptação e monitoramento de processos produtivos. Dentre as filosofias mais abordadas neste contexto está a produção enxuta, devido sua capacidade de otimizar processos e reduzir desperdícios ao mesmo tempo que aumenta a produtividade (Bauer et al., 2018; Wagner et al., 2017) É importante ressaltar que esta transformação nos processos organizacionais a partir da adoção tecnológica não impacta apenas na produtividade e redução de resíduos, mas também permite maior adaptabilidade e autogerenciamento organizacional, maior volume e análise de dados processuais, e melhor gestão de informação e comunicação, que se caracterizam como algumas das principais benesses das tecnologias emergentes (Lee et al., 2015).

Neste sentido, diversas pesquisas evidenciam a capacidade tecnológica de lidar com os desafios da sustentabilidade (Furstenau et al., 2020b), e caracterizam as tecnologias emergentes como uma excelente oportunidade para desenvolver e transformar organizações com bases nos pilares social, econômico e ambiental (Stock e Seliger, 2016). Isto ocorre porque a transformação de processos organizacionais a partir da adoção tecnológica permite o desenvolvimento de uma cadeia de valor integrada e inteligente (Schumacher et al., 2016). Esta cadeia de valor facilita o uso de recursos de maneira eficiente, mapeando os processos e a relação com clientes e fornecedores (Brenner, 2018) e criando assim uma sinergia entre organização e os pilares econômico, social e ambiental do desenvolvimento sustentável.

Neste contexto, diversas oportunidades podem ser exploradas para facilitar a integração de tecnologias aos processos tradicionais de produção e transformá-los em processos sustentáveis. Outras filosofias de gestão podem ser empregadas para auxiliar na modelagem e gestão da transformação em direção à sustentabilidade, como *Business Process Management (BPM)*, Teoria das Restrições (*TOC*), *Six Sigma*, e outras abordagens com grande potencial para transformar processos organizacionais. Além disso, outras tecnologias da indústria 4.0 podem ser exploradas para promover a transformação dos processos organizacionais em direção a sustentabilidade, como *machine learning*, *cyber security*, *big data* e *analytics*, *data mining*, robôs autônomos, inteligência artificial, computação em nuvem, simulação e realidade aumentada, entre outras. Tais tecnologias podem facilitar a gestão de dados, monitoramento em tempo real e ação imediata sobre os processos produtivos, otimizando os processos e reduzindo erros, desperdícios e emissões relacionados a produção. A redução de insumos e de desperdícios reduz os custos organizacionais, e a produção mais limpa atende os desejos de consumidores que, cada vez mais, almejam produtos sustentáveis e ambientalmente corretos.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta o diagrama estratégico da integração entre processos sustentáveis e indústria 4.0, identificando os temas mais importantes, as oportunidades e os desafios relacionados ao campo de estudo. Os resultados salientam treze temas com maior grau de desenvolvimento. Dentre os temas mais importantes estão questões relacionadas a emissão de carbono, performance ambiental e produção mais limpa, além do uso de tecnologias emergentes como sistemas cyber-físicos, impressões 3D e internet das coisas. Os temas evidenciam a integração entre tecnologias e processos, a preocupação com a transformação de processos tradicionais em processos verdes para a promoção da sustentabilidade, e a capacidade das tecnologias emergentes de auxiliarem no desenvolvimento sustentável.

Embora este trabalho tenha sido realizado com documentos de uma importante base de dados (Scopus), trabalhos futuros podem explorar outras bases para análise da área. Além disso, este trabalho se limitou a apresentar os temas estratégicos do campo de estudo, logo, a evolução

temática da área e a estrutura temática dos clusters não foram exploradas e podem ser abordadas em outras pesquisas. Trabalhos futuros podem explorar também as facetas econômicas e sociais da transformação de processos sustentáveis com apoio tecnológico, uma vez que os resultados do diagrama estratégico evidenciam que a maior parte dos esforços na área foram dedicados a implementação de tecnologias emergentes e no impacto ambiental causado pelos processos, explorando pouco os demais pilares da sustentabilidade. Em suma, este trabalho apresenta os temas estratégicos do campo de estudo e oferece suporte para pesquisas futuras relacionadas a transformação digital e processos sustentáveis, dois grandes desafios apoiados por diversas oportunidades para as fábricas do futuro.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- Bauer, H., Brandl, F., Lock, C., and Reinhart, G. (2018). Integration of Industrie 4.0 in Lean Manufacturing Learning Factories. *Procedia Manuf.* 23, 147–152. doi:10.1016/j.promfg.2018.04.008.
- Bourdeau, L. (1999). Sustainable development and the future of construction: A comparison of visions from various countries. *Build. Res. Inf.* 27, 354–366. doi:10.1080/096132199369183.
- Brenner, B. (2018). Transformative sustainable business models in the light of the digital imperative-a global business economics perspective. *Sustain.* 10. doi:10.3390/su10124428.
- Cherrafi, A., Elfezazi, S., Govindan, K., Garza-Reyes, J. A., Benhida, K., and Mokhlis, A. (2017). A framework for the integration of Green and Lean Six Sigma for superior sustainability performance. *Int. J. Prod. Res.* 55, 4481–4515. doi:10.1080/00207543.2016.1266406.
- Cobo, M. J., López-Herrera, A. G., Herrera-Viedma, E., and Herrera, F. (2012). SciMAT: A new science mapping analysis software tool. *J. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.* 63, 1609–1630. doi:10.1002/asi.22688.
- Ford, S., and Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *J. Clean. Prod.* 137, 1573–1587. doi:10.1016/j.jclepro.2016.04.150.
- Furstenau, L. B., Kipper, L. M., Sott, M. K., Dal Forno, A. J., and Frozza, R. (2019a). Utilização das ferramentas da qualidade para redução de perdas de produção em máquina CNC. *XXXIX Encontro Nac. Eng. produção.* doi:10.14488/ENEGEP2019_TI_ST_290_634_38321.
- Furstenau, L. B., Sott, M. K., Jonas Ouriques Homrich, A., Mahlmann Kipper, L., Aziz Al Abri, A., Flores Cardoso, T., et al. (2020a). 20 Years of Scientific Evolution of Cyber Security: a Science Mapping. Available at: <http://www.ieomsociety.org/ieom2020/papers/376.pdf> [Accessed July 12, 2020].
- Furstenau, L. B., Webber, T., Kipper, L. M., Julia, A., Forno, D., and Sott, M. K. (2019b). Proposta de estrutura para a gestão do processo de precificação de produtos de uma empresa de base tecnológica. *XXXIX Encontro Nac. Eng. produção.* doi:10.14488/ENEGEP2019_TI_ST_290_634_38321.
- Furstenau, L., Sott, M., Kipper, L., Access, Ê. M.-I., and 2020, U. (2020b). Link between sustainability and industry 4.0: trends, challenges and new perspectives. *IEEE Access.* Available at: <https://eprints.gla.ac.uk/221480/> [Accessed August 1, 2020].
- Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A., and Hou, L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: A literature review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 67, 1191–1203. doi:10.1007/s00170-012-4558-5.
- Ivanov, D., Dolgui, A., Sokolov, B., Werner, F., and Ivanova, M. (2016). A dynamic model and an algorithm for short-term supply chain scheduling in the smart factory industry 4.0. *Int. J. Prod. Res.* 54, 386–402. doi:10.1080/00207543.2014.999958.

- Ivascu, L. (2020). Measuring the implications of sustainable manufacturing in the context of industry 4.0. *Processes* 8. doi:10.3390/PR8050585.
- Kipper, L. M., Furstenau, L. B., Hoppe, D., Frozza, R., and Iepsen, S. (2020). Scopus scientific mapping production in industry 4.0 (2011–2018): a bibliometric analysis. *Int. J. Prod. Res.* 58, 1605–1627. doi:10.1080/00207543.2019.1671625.
- Kumar, S., Purohit, B. S., Manjrekar, V., Singh, V., and Lad, B. K. (2018). Investigating the value of integrated operations planning: A case-based approach from automotive industry. *Int. J. Prod. Res.* 56, 6971–6992. doi:10.1080/00207543.2018.1424367.
- Lee, J., Bagheri, B., and Kao, H. A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manuf. Lett.* 3, 18–23. doi:10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
- Liu, B., and De Giovanni, P. (2019). Green process innovation through Industry 4.0 technologies and supply chain coordination. *Ann. Oper. Res.* doi:10.1007/s10479-019-03498-3.
- López-Robles, J., Otegi-Olaso, J., and ... M. C.-... and E. in (2020). *Exploring the relationships between Project Management and Industry 4.0 in Scopus literature using bibliometric and content analysis*. Available at: http://dspace.aepro.com/xmlui/bitstream/handle/123456789/2415/REPM2020_proceedings.pdf?sequence=1#page=60 [Accessed July 12, 2020].
- Luthra, S., and Mangla, S. K. (2018). Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies. *Process Saf. Environ. Prot.* 117, 168–179. doi:10.1016/j.psep.2018.04.018.
- Maresova, P., Soukal, I., Svobodova, L., Hedvicakova, M., Javanmardi, E., Selamat, A., et al. (2018). Consequences of industry 4.0 in business and economics. *Economies* 6. doi:10.3390/economies6030046.
- Nascimento, D. L. M., Alencastro, V., Quelhas, O. L. G., Caiado, R. G. G., Garza-Reyes, J. A., Lona, L. R., et al. (2019). Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: A business model proposal. *J. Manuf. Technol. Manag.* 30, 607–627. doi:10.1108/JMTM-03-2018-0071.
- Nwaiwu, F., Duduci, M., Chromjakova, F., and Otekhile, C. A. F. (2020). Industry 4.0 concepts within the czech sme manufacturing sector: An empirical assessment of critical success factors. *Bus. Theory Pract.* 21, 58–70. doi:10.3846/btp.2020.10712.
- Oesterreich, T. D., and Teuteberg, F. (2016). Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Comput. Ind.* 83, 121–139. doi:10.1016/j.compind.2016.09.006.
- Schumacher, A., Erol, S., and Sihm, W. (2016). A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. *Procedia CIRP* 52, 161–166. doi:10.1016/j.procir.2016.07.040.
- Sheth, J. N., Sethia, N. K., and Srinivas, S. (2011). Mindful consumption: A customer-centric approach to sustainability. *J. Acad. Mark. Sci.* 39, 21–39. doi:10.1007/s11747-010-0216-3.
- Sony, M., and Naik, S. (2020). Critical factors for the successful implementation of Industry 4.0: a review and future research direction. *Prod. Plan. Control* 31, 799–815. doi:10.1080/09537287.2019.1691278.
- Sott, M. K. (2016). Análise do grau de satisfação dos clientes de uma empresa varejista de alimentos do município de Santa Cruz do Sul, RS. Trabalho de Conclusão de Curso. <https://repositorio.unisc.br/jspui/handle/11624/1519>. Available at: <https://repositorio.unisc.br/jspui/handle/11624/1519> [Accessed July 26, 2020].
- Sott, M. K., Furstenau, L. B., Kipper, L. M., ... F. G.-I., and 2020, U. (2020). Precision Techniques and Agriculture 4.0 Technologies to Promote Sustainability in the Coffee Sector: State of the Art, Challenges and Future Trends. *IEEE Access*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9166468/> [Accessed August 27, 2020].

- Stock, T., and Seliger, G. (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP* 40, 536–541. doi:10.1016/j.procir.2016.01.129.
- Sun, Y., Du, J., and Wang, S. (2020). Environmental regulations, enterprise productivity, and green technological progress: large-scale data analysis in China. *Ann. Oper. Res.* 290, 369–384. doi:10.1007/s10479-019-03249-4.
- Tsai, W. H. (2018). Green production planning and control for the textile industry by using mathematical programming and industry 4.0 techniques. *Energies* 11. doi:10.3390/en11082072.
- Wagner, T., Herrmann, C., and Thiede, S. (2017). Industry 4.0 Impacts on Lean Production Systems. *Procedia CIRP* 63, 125–131. doi:10.1016/j.procir.2017.02.041.