

Modelos de maturidade para a indústria 4.0: uma revisão sistemática da literatura

Maturity models for industry 4.0: a systematic literature review

Modelos de madurez para la industria 4.0: una revisión sistemática de la literatura

Como citar:

Medeiros, Eveliny D.; Santos, Luciano C.; Gohr, Cláudia F. (2024). Modelos de maturidade para a indústria 4.0: uma revisão sistemática da literatura. Revista Gestão & Tecnologia, vol. 24, nº 5, p. 154-181

Eveliny Dias de Medeiros
Doutoranda em Engenharia de Produção na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
<http://orcid.org/0000-0002-3756-194X>

Luciano Costa Santos
Professor na Universidade Federal da Paraíba
<http://orcid.org/0000-0002-7271-8607>

Cláudia Fabiana Gohr
Professora da Universidade Federal da Paraíba
<http://orcid.org/0000-0001-9774-7140>

Os autores declaram não haver qualquer conflito de interesse pessoal ou institucional entre a pesquisa e as organizações em estudo.

Editor Científico: José Edson Lara
Organização Comitê Científico
Double Blind Review pelo SEER/OJS
Recebido em 24/03/2024
Aprovado em 06/11/2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution – Non-Commercial 3.0 Brazil



Resumo

Objetivo: Apresentar um quadro de referência dos modelos de maturidade (MMs) para a I4.0 e uma agenda de pesquisa.

Metodologia: Foi adotada uma revisão sistemática da literatura nas bases de dados Web of Science e Scopus.

Originalidade/Relevância: A identificação dos elementos que possibilitam a avaliação da integração entre níveis e dimensões dos MM para a I4.0 é um tópico de pesquisa relevante.

Resultados: Os MMs possuem em média cinco níveis de maturidade, do inexistente ao avançado, e apresentam dimensões relacionadas à tecnologia e dimensões de suporte (estratégia, operações, cultura, pessoas, segurança, etc.).

Contribuições teóricas: O quadro de referência auxilia na adoção ou no desenvolvimento de novos modelos. Destaca também a ausência de modelos para o setor de serviços e a necessidade de investigações voltadas para a sistematização de uma abordagem integrada.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Modelos de maturidade; Revisão sistemática.

Abstract

Aim: To present a reference framework for maturity models (MMs) for I4.0 and a research agenda.

Method: A systematic literature review was applied in the Web of Science and Scopus databases.

Originality/Relevance: The identification of elements that enable the assessment of integration between levels and dimensions of MM for I4.0 is relevant.

Results: Indicate that MMs have an average of five maturity levels, from non-existent to advanced, and present dimensions related to technology and support dimensions.

Theoretical contributions: The reference framework assists in the adoption or development of new models. The results highlight the need (i) for models for the service sector and (ii) for investigations for integrated approaches.

Keywords: Industry 4.0; Maturity models; Systematic review.

Resumen

Objetivo: Presentar un marco de referencia para modelos de madurez (MM) para I4.0 y una agenda de investigación.

Metodología: Se aplicó una revisión sistemática de la literatura en las bases de datos Web of Science y Scopus.

Originalidad/Relevancia: Es relevante la identificación de elementos que permitan evaluar la integración entre niveles y dimensiones de MM para I4.0.

Principales resultados: Los MM tienen en promedio cinco niveles de madurez, desde inexistente hasta avanzado, y presentan dimensiones relacionadas con la tecnología y dimensiones de soporte.

Aportes teóricos: El marco de referencia ayuda en la adopción o desarrollo de nuevos modelos. Los resultados resaltan la necesidad (i) de modelos para el sector de servicios y (ii) de investigaciones para enfoques integrados.

Palabras clave: Industria 4.0; Modelos de madurez; Revisión sistemática.

1. INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica tem sido representada pela Indústria 4.0 (I4.0). Esta promove mudanças nos processos operacionais ao utilizar-se de uma abordagem fortemente baseada em tecnologias (Sadiq *et al.*, 2021). Tais tecnologias promovem melhoria nos processos, produtos customizados e em massa, permitindo que as empresas alcancem melhores níveis de desempenho (Zuehlke, 2010; Závadská & Závadský, 2020). Embora seja uma revolução em curso, as empresas necessitam de preparação e, nesse sentido, os modelos de maturidade (MM) direcionam as ações das organizações em direção ao modelo 4.0 (Bibby & Dehe, 2018).

Um MM tem por finalidade avaliar os processos de negócios a partir de diversas perspectivas, também chamadas de dimensões, para revelar os pontos fortes e fracos críticos para a adoção de tecnologias da I4.0, considerando diferentes níveis de análise (de Jesus & Lima, 2020; Vasconcelos, Luis Rigato Junior, Paulo Gobo, Rodrigues, 2021). Em se tratando de MMs para a I4.0, acadêmicos e profissionais têm desenvolvido vários, com dimensões e níveis de avaliação, no entanto, ainda não há um consenso sobre os elementos que constituem a maturidade para I4.0, tampouco modelos que englobem níveis e dimensões abrangentes e que sejam aplicáveis em diversas organizações (de Jesus & Lima, 2020; Dikhanbayeva *et al.*, 2020). Algumas revisões de literatura também têm mostrado modelos genéricos ou específicos por setor (de Jesus & Lima, 2020; de Souza *et al.*, 2020). Entretanto, esses estudos são limitados para a definição de dimensões e níveis em um MM para a I4.0.

O objetivo deste é sintetizar, a partir de uma revisão sistemática da literatura (RSL), os MM para a I4.0, apresentando um quadro de referência para auxiliar na adoção ou no desenvolvimento de novos modelos, além de sugerir uma agenda de pesquisa para orientar futuros estudos. Embora alguns autores tenham desenvolvido RSLs sobre MM para a I4.0, estes trabalhos apresentam limitações. Por exemplo, Elibal & Özceylan (2020) analisaram características dos estudos, não se aprofundando a análise das dimensões e níveis. Simetinger & Zhang (2020) analisaram características compartilhadas da I4.0 que são comuns à maioria

aos MM, não focando, em procedimentos de aplicação. Assim, o desenvolvimento deste artigo é relevante pois a identificação dos elementos que possibilitam a avaliação da integração entre níveis e dimensões dos MM para a I4.0 surge como um tópico de pesquisa crucial, e é importante ressaltar que o número de publicações científicas nessa área ainda é comparativamente baixo em relação a outros temas da engenharia (Santos-Neto & Costa, 2019). De Jesus & Lima (2020) afirmam que a compreensão dessa integração entre níveis e dimensões pode desempenhar um papel fundamental na determinação das dimensões a serem consideradas, alinhadas com as necessidades específicas de cada empresa. Desta forma, os resultados podem oferecer um valioso apoio tanto para pesquisadores quanto para gestores na concepção de ferramentas práticas e robustas voltadas à avaliação da maturidade na adoção dos conceitos e tecnologias da I4.0.

O artigo possui cinco seções, incluindo esta introdução. A segunda apresenta os procedimentos metodológicos para o desenvolvimento da RSL. A terceira descreve os resultados, enquanto a quarta mostra uma síntese dos modelos e propõe uma agenda de pesquisa. Por fim, a quinta discorre sobre as conclusões, contribuições e limitações da pesquisa.

2. MÉTODOS

A RSL é um método que possibilita analisar a literatura disponível, obter uma visão geral sobre determinado tema e identificar as lacunas da literatura, a partir de um procedimento estruturado de busca e análise de material bibliográfico (Tranfield et al., 2003). Uma RSL possibilita identificar áreas de conhecimento que precisam de estudos aprofundados (Tranfield et al., 2003) como é o caso da presente pesquisa. As etapas adotadas neste artigo estão apresentadas na Figura 1 e são detalhadas a seguir.

2.1 Planejamento

Nesta fase foi realizada uma pesquisa exploratória para compreender o tema e definir os termos de busca associados à (i) I4.0, sendo adotados os termos "*Industrie 4.0*" or "*Industry 4.0*"; e (ii) MM, sendo adotados os termos "*Maturity model*" or "*Maturity approach*" or "*Maturity assessment*". As bases de dados utilizadas foram *Web of Science* (WoS) e *Scopus*,

pois possuem notoriedade para a academia e desempenham um papel importante nas análises bibliométricas (Wang & Waltman, 2016).

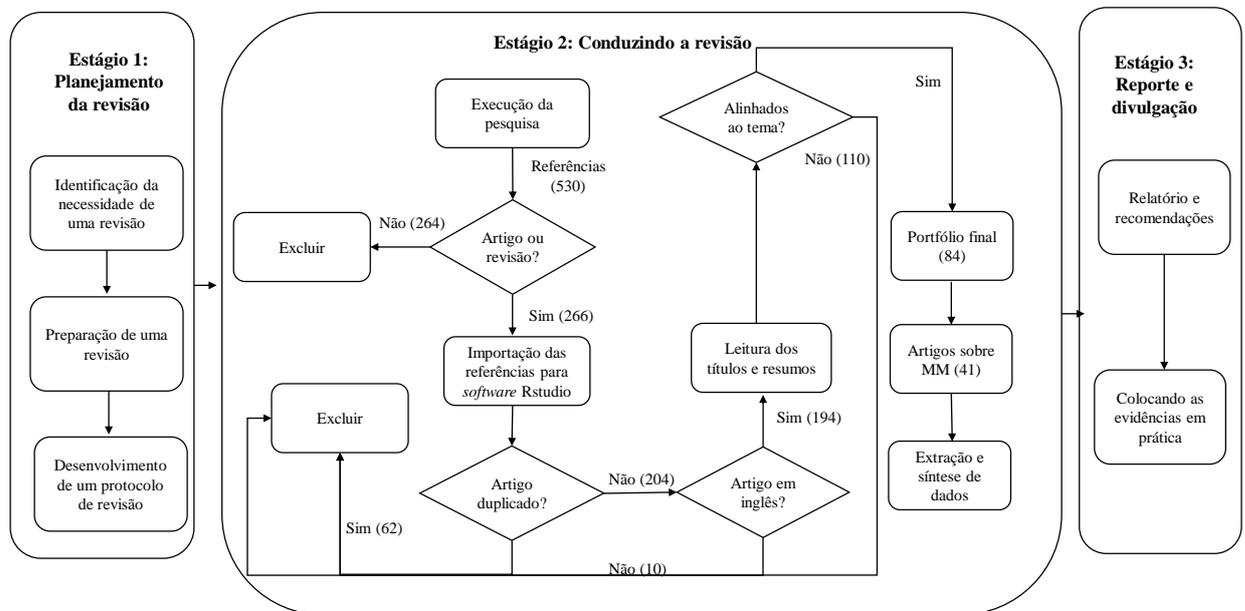


Figura 1. Etapas

Fonte: Tranfield *et al.* (2003)

2.2 Conduzindo, reportando e divulgando

A pesquisa contemplou artigos até dezembro de 2022, sem data inicial definida. Na WoS, a categoria de pesquisa foi “tópico”; e na Scopus fo *search within*. Como resultado, obteve-se um total de 530 publicações (Figura 1). Considerou-se apenas artigos e revisões não sendo contemplados modelos concebidos para o contexto da indústria, como o desenvolvido pelo Instituto Alemão, uma vez que nossa abordagem foi limitada à literatura acadêmica. Após filtragem, obteve-se uma amostra de 266 trabalhos.

O *software RStudio* foi usado para eliminar os artigos duplicados, resultando em 204 artigos. Desses, foram selecionados 194 artigos em inglês. Na sequência, analisou-se títulos e resumos, e posteriormente a leitura na íntegra foi realizada, considerando como critério de inclusão os estudos alinhados aos MMs da I4.0. Foram excluídos os artigos cujos MM não eram aplicados à I4.0; e aqueles que versavam apenas sobre tecnologias; ou aqueles que, por outros

motivos, não se adequavam ao estudo, resultando em 84 artigos. Por fim, após leitura verificou-se que 41 tratavam especificamente de MMs para I4.0.

Conforme proposto por Tranfield *et al.* (2003), após a seleção, iniciou-se o processo de extração e análise, sendo adotada a técnica de análise de conteúdo, sendo esta considerada uma técnica flexível, tendo sido utilizada para diferentes metas e objetivos de pesquisa (White & Marsh, 2006). De acordo com os autores, a sua aplicação ocorre de forma qualitativa e/ou quantitativa, empregando uma ampla gama de técnicas.

A extração de dados foi feita por meio de planilhas do Microsoft *Excel*, sendo coletadas as seguintes informações: ano, autor, setor econômico de aplicação, métodos, formas de aplicação, dimensões, níveis e limitações dos modelos. Foi realizada uma análise quantitativa e descritiva por meio de técnicas bibliométricas; e uma análise semântica e interpretativa, a fim de delinear o que já é conhecido e estabelecido sobre o tema (Tranfield *et al.*, 2003). Ao final, desenvolveu-se uma síntese das dimensões e níveis, identificou-se as limitações dos modelos, tendências e *gaps*, propondo uma agenda de pesquisa.

3. RESULTADOS

Os 41 MM (Tabela 1) foram aplicados predominantemente no setor manufatureiro (61%) (Figura 2a), mostrando que ainda há poucas aplicações em serviços, sendo verificado modelos aplicados em logística (12%) ou serviços de defesa (3%). No que tange aos métodos científicos (Figura 2b), há predominância dos qualitativos (estudos de caso - 20%; pesquisa com especialistas - 4%), isto é, os modelos foram testados e/ou aplicados em uma ou poucas empresas; ou foram avaliados a partir da opinião de especialistas.

Tabela 1
MM para I4.0

| Autores | Nº | Autores | Nº |
|-------------------------------|-----|--------------------------------------------------------------|------|
| (Ganzarain & Errasti, 2016) | MM1 | (Amaral & Peças, 2021) | MM22 |
| (Asdecker & Felch, 2018) | MM2 | (Caiado <i>et al.</i> , 2021) | MM23 |
| (Bibby & Dehe, 2018) | MM3 | (Chaopaisarn & Woschank, 2021)(Chaopaisarn & Woschank, 2021) | MM24 |
| (Sjödin <i>et al.</i> , 2018) | MM4 | (Chonsawat & Sopadang, 2021) | MM25 |

| Autores | Nº | Autores | Nº |
|---------------------------------|------|------------------------------------------|------|
| (Basl & Doucek, 2019) | MM5 | (Çinar <i>et al.</i> , 2021) | MM26 |
| (Bukowski, 2019) | MM6 | (Rahamaddulla <i>et al.</i> , 2021) | MM27 |
| (Colli <i>et al.</i> , 2019) | MM7 | (Stawiarska <i>et al.</i> , 2021) | MM28 |
| (Gajsek <i>et al.</i> , 2019) | MM8 | (Vasconcelos <i>et al.</i> , 2021) | MM29 |
| (Pacchini <i>et al.</i> , 2019) | MM9 | (Ávila-Bohoquez & Gil-Herrera, 2022) | MM30 |
| (Pirola <i>et al.</i> , 2020) | MM10 | (Beisekenov <i>et al.</i> , 2022) | MM31 |
| (Santos & Martinho, 2019) | MM11 | (Castelo-Branco <i>et al.</i> , 2022) | MM32 |
| (Dutta <i>et al.</i> , 2020) | MM12 | (Felippes <i>et al.</i> , 2022) | MM33 |
| (Facchini <i>et al.</i> , 2020) | MM13 | (de Paula Ferreira <i>et al.</i> , 2022) | MM34 |
| (Herceg <i>et al.</i> , 2020) | MM14 | (Gallego <i>et al.</i> , 2022) | MM35 |
| (Lin <i>et al.</i> , 2020) | MM15 | (Gökalp & Martinez, 2022) | MM36 |
| *(Moura & Kohl, 2020) | MM16 | (Honorato & Melo, 2022) | MM37 |
| (Peukert <i>et al.</i> , 2020) | MM17 | (Kirmizi & Kocaoglu, 2022) | MM38 |
| (Rafael <i>et al.</i> , 2020) | MM18 | (Naeem & Garengo, 2022) | MM39 |
| (Sütöová <i>et al.</i> , 2020) | MM19 | (Ramanathan & Samaranayake, 2022) | MM40 |
| (Wagire <i>et al.</i> , 2021) | MM20 | (Ünal <i>et al.</i> , 2022) | MM41 |
| (Aagaard <i>et al.</i> , 2021) | MM21 | | |

*Moura & Kohl (2020) aplicaram modelo existente.

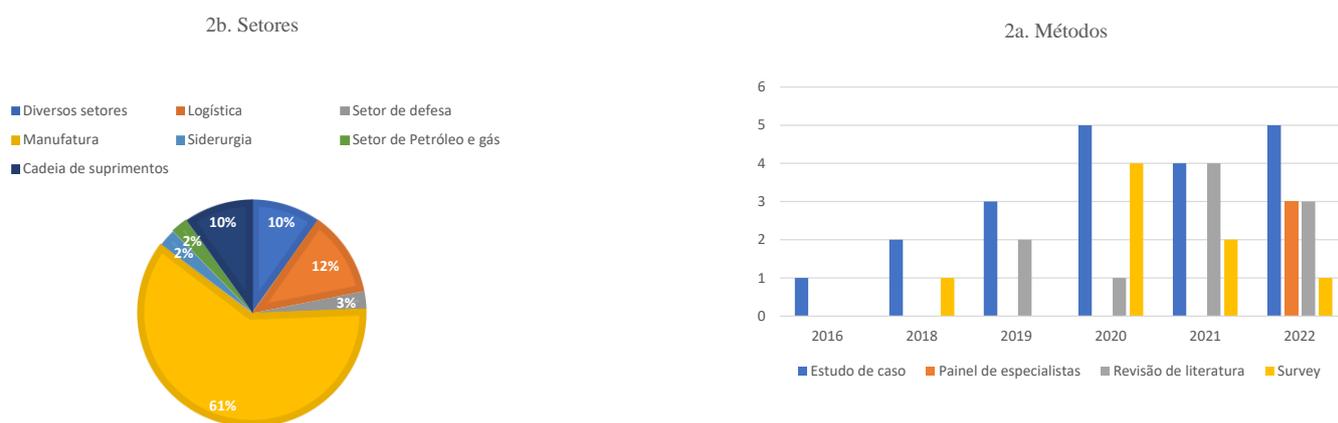


Figura 2. Setores e métodos

Os modelos apresentavam diferentes níveis (Tabela 2), que são rótulos graduais que significam estágios de maturidade, servindo para indicar o grau e a evolução da organização em determinado aspecto. Esta evolução ocorre por meio da consolidação de práticas específicas relacionadas a uma totalidade de processos predefinidos que aumentam o desempenho (de Souza et al., 2020). Os níveis de maturidade devem ser descritos de forma a contemplar sua qualificação e características detalhadas. As características de cada nível devem ser distintas e empiricamente testáveis, devendo a relação de cada nível com o seu predecessor e sucessor serem bem definidas (Rafael et al., 2020).

Os MMs apresentam semelhanças nos níveis. Nos primeiros a organização não possui avanços em relação à I4.0 e nos últimos já implementou completamente as tecnologias. Os MM compartilham de cinco a sete níveis (além do Nível 0, presente em alguns modelos). A maioria deles indica nível inicial quando nenhum avanço está presente ou quando a implementação é incipiente, correspondendo ao nível 0 ou 1. No nível zero, o controle sobre os processos é frágil, resultando em operações ineficientes (Çınar et al., 2021; Lin et al., 2020; Moura & Kohl, 2020; Pacchini et al., 2019; Rafael et al., 2020; Ramanathan & Samaranayake, 2022; Santos & Martinho, 2019). De forma semelhante, o nível 1 engloba organizações que carecem de uma visão específica da I4.0 ou são alheias. É importante observar que os níveis 0 e 1 representam estágios nos quais as organizações estão afastadas ou têm apenas uma incipiente implementação, muitas vezes carentes dos atributos estratégicos para apoiar a adoção dessa abordagem (Ávila-Bohórquez & Gil-Herrera, 2022; Colli et al., 2019; Facchini et al., 2020; Felippes et al., 2022; Ganzarain & Errasti, 2016; Mittal et al., 2020; Sütöová et al., 2020; Wagire et al., 2020).

No nível 2, os modelos convergem, pois há um grau substancial de conectividade entre setores e processos, com a implementação de ações alinhadas à I4.0. Aagaard *et al.* (2021) e Herceg *et al.* (2020) indicam que neste ponto a maturidade é moderada. Chonsawat e Sopadang (2021) consideram que as organizações ainda possuem uma capacidade tecnológica relativamente baixa. Para Çınar *et al.* (2021), este estágio indica que as empresas já deram o

primeiro passo em direção à I4.0, e para Honorato e Melo (2023), esse patamar implica que a empresa está em uma fase de atenção em relação à I4.0.

No nível 3, as organizações possuem grau de maturidade sólido e estabelecido onde os princípios da I4.0 se tornam mais visíveis. De acordo com Çinar *et al.* (2021) e Ávila-Bohórquez e Gil-Herrera (2022), este nível é chamado de "com experiência", o que significa que as empresas estão utilizando tecnologias em áreas específicas, embora não as tenham implementado de forma abrangente. No modelo de Sjödín *et al.* (2018), o nível 4 representa o ápice da implantação, no qual a organização atinge autonomia, fabricação inteligente, previsível, e uma visão de futuro. Os autores resumem outras concepções, caracterizando este nível como um estágio de potencial real e futuro detalhado, digitalização abrangente, integração completa e um alto nível de conscientização. Chonsawat e Sopadang (2021) afirmam que as organizações alcançam alto desempenho e qualidade em seus processos, mas ainda têm espaço para evolução.

No nível 5, compartilham características semelhantes ao nível 4, mas com uma ênfase maior na otimização (Lin *et al.*, 2020), melhorias de desempenho (Rafael *et al.*, 2020) e monitoramento contínuo. Esses elementos indicam que a I4.0 está consolidada e tem a capacidade de continuar evoluindo, sendo considerado o estágio máximo de maturidade na maioria dos modelos. Assim, a organização se torna uma referência na aplicação dos conceitos e na implementação da I4.0 (Santos & Martinho, 2020; Ávila-Bohórquez & Gil-Herrera, 2022), com melhorias de desempenho (Rafael *et al.*, 2020) e monitoramento contínuo. Para Felippes *et al.* (2022), neste nível há uma variedade de sistemas autônomos, tecnologias avançadas e processos de estrutura organizacional altamente adaptáveis, permitindo a auto-otimização. Ünal *et al.* (2022) descrevem tecnologias em um nível muito avançado e maduro. A gestão abraça plenamente essas tecnologias e fornece suporte. Os funcionários demonstram altas competências nas tecnologias que são aplicadas em todos os departamentos e adotadas pelos clientes e fornecedores em um nível avançado. A segurança dos dados é uma prioridade em todos os aspectos da operação, que também atende integralmente a todos os requisitos regulatórios e aproveita os incentivos disponíveis. Nesse nível, a transição completa para a I4.0 foi alcançada, representando o objetivo máximo das empresas na jornada da I4.0.

Tabela 2
Níveis – Estágios de maturidade

| MM | Níveis | | | | | | | |
|----|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | | Sem visão específica para a I4.0 | Visão customizada I4.0 | Desenvolver compreensão da I4.0 com capacidades e recursos - segmentos de clientes, expectativas e propostas de valor - projetos avaliados e recursos e colaboração | Mapa de oportunidades - segmentos de clientes e expectativas, VPM e tecnologias / recursos definidos - Projeto de potencial real e futuro detalhado | Desafios futuros pela I4.0 | | |
| 2 | | Digitalização básica | Digitalização entre departamentos | Digitalização horizontal e vertical | Digitalização completa | Digitalização completa otimizada | | |
| 3 | | Mínimo | Definido | Desenvolvimento | Excelência | | | |
| 4 | | Tecnologias conectadas | Coleta e compartilhamento de dados estruturados | Análise e otimização do processo em tempo real | Fabricação inteligente e previsível | | | |
| 5 | | Visão atual da sociedade (Sociedade 4.0) | Área da sociedade (I4.0, Agricultura 4.0, Saúde 4.0, etc) | Setor dentro de uma área individual da sociedade | Toda a empresa | Área dentro de uma empresa | Dimensões dentro da área | Uma subdimensão dentro de uma dimensão |
| 6 | | Insuficiente | Baixo | Moderado | Alto nível | Muito alta | | |
| 7 | | Nenhum | Básico | Transparente | Consciente | Autônomo | Integrado | |
| 8 | | Estágio 1 (informatização) | Estágio 2 (conectividade) | | | | | |
| 9 | O pré-requisito (tecnologias 4.0) não está presente | O pré-requisito (tecnologias 4.0) existe, de forma incompleta | O pré-requisito (tecnologias 4.0) existe e está quase totalmente implementado | O requisito (tecnologias 4.0) está totalmente implementado | | | | |

| MM | Níveis | | | | | | | |
|----|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 10 | | Formulou estratégia da I4.0 e investe para promover a introdução de manufatura inteligente | Inclui a I4.0 em sua estratégia | Estratégia da I4.0 e investe para promover a introdução de manufatura inteligente | Está implementando uma estratégia da I4.0, monitora seu desenvolvimento com indicadores | Já implementou sua estratégia da I4.0 e monitora continuamente sua implementação | | |
| 11 | Baixo ou nenhum grau | Ações piloto | Implementação das ações iniciadas, com alguns benefícios observados | Implementação parcial de ações, que aumentem a competitividade | Implementação avançada de ações, com retorno econômico claro | Referência na aplicação dos conceitos e implementação das tecnologias | | |
| 12 | | Design de produto - gerenciamento do programa | Planejamento da manufatura-definição do processo de fabricação | Engenharia de produção-planejamento e simulação de automação de máquina/ linha/ célula | Execução da manufatura-gestão da qualidade | Serviços – manutenção | | |
| 13 | | Inicial | Gerenciado | Definido | Gerenciado quantitativamente | Otimizado | | |
| 14 | | Menor maturidade digital | Maturidade digital mediana | Maturidade digital superior | | | | |
| 15 | Iniciado | Realizado | Gerenciado | Estabelecido | Integrado e Interoperado | Otimizado | | |
| 16 | Não iniciado | Iniciante | Intermediário | Experiente | Especialista | Melhor desempenho | | |
| 17 | | Inicialização | Análise | Conceito | Realização | Demonstração | | |
| 18 | <i>Outsider</i> | Iniciante | Intermediário | Experiente | Especialista | Melhor desempenho | | |
| 19 | | Falta de suporte à estratégia de I4.0 | Representa um iniciante digital | Um integrador vertical | Colaborador horizontal | Campeão digital | | |
| 20 | | Estranho | Novato digital | Experiente | Especialista | | | |
| 21 | | Baixo | Médio | Alto | | | | |
| 22 | | Tecnologia | Processos de produção | Mudança | | | | |
| 23 | Inexistente | Conceitual | Gerenciado | Avançado | Auto otimizado | | | |
| 24 | | Inicial | Repetível | Definido | Gerenciado | Otimizado | | |
| 25 | | Inicial | Gerenciado | Definido | Gerenciado qualitativamente | Otimizado | | |
| 26 | Não iniciado | Principiante | Intermediário | Com experiência | Melhor desempenho | | | |
| 27 | | Iniciante em tecnologia | Novato em tecnologia | Aprendiz em tecnologia | Especialista em tecnologia | Líder em tecnologia | | |

| MM | Níveis | | | | | | | | |
|----|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|--|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 28 | | <p>Digitalização do do Sistema de Produção (DPS)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Iniciação da digitalização <p>Digitalização do do Sistema Logístico (DLS)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Iniciação da digitalização <p>Maturidade do Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sem abordagem formal <p>Maturidade da Gestão de Recursos Humanos (HRM)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Habilidades básicas de engenharia <p>Intensidade das atividades de SER (ICSR)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Iniciação | <p>DPS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Digitalização básica <p>DLS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Digitalização básica <p>SGQ</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abordagem reativa <p>HRM</p> <ul style="list-style-type: none"> • Habilidades pessoais <p>ICSR</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inclusão/ Capacidade | <p>DPS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Digitalização departamental <p>DLS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Digitalização departamental <p>SGQ</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aproximação de sistemas formais e estáveis <p>HRM</p> <ul style="list-style-type: none"> • Habilidades sociais na organização <p>ICSR</p> <ul style="list-style-type: none"> • Integração | <p>DPS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Digitalização interdepartamental <p>DLS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Digitalização interdepartamental <p>SGQ</p> <ul style="list-style-type: none"> • Melhoria contínua <p>HRM</p> <ul style="list-style-type: none"> • Habilidades técnicas <p>ICSR</p> <ul style="list-style-type: none"> • Otimização | <p>DPS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Digitalização completa <p>DLS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Digitalização completa <p>SGQ</p> <ul style="list-style-type: none"> • Melhor desempenho <p>HRM</p> <ul style="list-style-type: none"> • Habilidades para I4.0 <p>ICSR</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pioneirismo | | | |
| 29 | Crítico | Inicial | Alerta | Aceitável | Ótimo | Ideal | | | |
| 30 | | Não geraram concretamente atividade ou aplicação de elementos | Iniciaram estrategicamente as atividades de pesquisa e estudos pilotos para incluir e tecnologia apropriada | Aplicaram parcialmente as tecnologias em seus processos | Possuem tecnologias altamente aplicadas a seus processos | Implementaram diferentes elementos e alcançaram o escopo que é coberto pela I4.0 | | | |

| MM | Níveis | | | | | | | |
|----|--------------------|------------------------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|------------------------|--------------------------|---------------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 31 | | Entrante | Iniciante | Aprendiz | Integrador | Especialista | | |
| 32 | | Estratégia de TI e segurança cibernética | Habilitadores | Fábrica Inteligente | Proposta de valor | Experiência do cliente | | |
| 33 | Não iniciado | Iniciado | Gerenciado | Definido | Otimizado | Auto adaptado | | |
| 34 | <i>Outsider</i> | Iniciante | Intermediário | Experiente | Especialista | Melhor desempenho | | |
| 35 | Gestão Estratégica | Processos técnicos | Fatores de produção | Gestão Operativa | Gestão tática | Integração vertical | Integração horizontal | Impactos Econômicos |
| 36 | Incompleto | Realizado | Gerenciado | Estabelecido | Previsível | Inovando | | |
| 37 | | Muito baixa | Baixa | Relevante | Alta | | | |
| 38 | | Conscientização | Piloto | Engajado | Integrado | Otimizado | | |
| 39 | | Inconsciente | Consciente | Consciente, mas não pronto | Pronto para digital | Conectado digitalmente | Digitalmente inteligente | |
| 40 | Nenhum | Baixo | Inicial | Médio | Alto | | | |
| 41 | Não iniciado | Iniciado | Intermediário | Avançado | Muito avançado | Maduro | | |

Os níveis 6 ou 7 são adicionais, referem-se aos melhores desempenhos e se caracterizam pela implementação completa da I4.0, monitorando o estágio alcançado, para manter o patamar. Esses níveis incorporam subdimensões que detalham aspectos específicos de cada área da organização.

O modelo de Gallego-García *et al.* (2022) difere dos demais modelos ao agrupar as atividades de produção em oito módulos distintos e sequenciais, que abrangem o nível estratégico até a avaliação da integração horizontal na cadeia de suprimentos. Além disso, eles descrevem como uma organização pode ser dividida em oito áreas, cada uma com fatores específicos. Esse modelo enfatiza a importância do desenvolvimento desse quadro para avaliar a maturidade e identificar áreas de melhoria. Vale ressaltar que os fatores de maturidade podem variar conforme o setor, os processos técnicos e de gestão, o estado organizacional e a composição dos parceiros na cadeia de suprimentos.

Os MMs também apresentavam dimensões que representam um campo de aplicação ou áreas de processos que estruturam um campo de interesse. Cada dimensão é especificada por

medidas (práticas, objetos ou atividades) (Rafael et al., 2020). Os modelos utilizam dimensões como critérios para determinar o nível de aptidão em cada dimensão acerca da aderência à I4.0. Elas correspondem a elementos relacionados ao planejamento e organização da empresa (visão, estratégia, liderança, cultura, pessoas, operações processos, tecnologia, etc.), tecnologias da I4.0 (internet das coisas, *big data*, computação em nuvem, sistemas *ciber* físicos, robôs colaborativos, manufatura aditiva, realidade aumentada, inteligência artificial, etc.) e elementos do ambiente externo (sociedade, mercados, clientes, governança, etc.). Para analisar as dimensões dos MMs que fazem parte do escopo deste artigo, estas foram agrupadas considerando categorias mais amplas para uma compreensão mais concisa das áreas críticas avaliadas pelos MMs, eliminando redundâncias e simplificando a avaliação (Tabela 3).

Tabela 3
Dimensões dos MMs

| MM | DIMENSÕES | | | | | | | | |
|------|-------------------|------------|-------------------|----------------------|------------|-------------|-----------|------------|------------------|
| | Pessoas e cultura | Estratégia | Produto/ Serviços | Processos/ Operações | Governança | Organização | Segurança | Tecnologia | Criação de valor |
| MM1 | | • | • | • | | | • | • | |
| MM2 | | | | | | | • | • | |
| MM3 | • | • | | • | | | • | • | |
| MM4 | • | | | • | | | • | • | |
| MM5 | • | | | | | • | • | • | |
| MM6 | | | | | | | • | • | |
| MM7 | • | | | | • | | • | • | • |
| MM8 | • | | | | • | | • | • | • |
| MM9 | | | • | • | | • | • | • | |
| MM10 | • | • | | • | | | • | • | |
| MM11 | • | • | • | • | | • | • | • | |
| MM12 | | | • | | | | • | • | • |
| MM13 | | | | | | | • | • | |
| MM14 | • | • | | • | | • | • | • | |
| MM15 | | | | • | | • | • | • | |
| MM16 | • | • | • | • | | • | • | • | |
| MM17 | • | | | • | | • | • | • | |
| MM18 | | • | • | • | | • | • | • | |
| MM19 | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| MM20 | • | • | • | • | | • | • | • | • |

| | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| MM21 | • | • | | • | | • | • | • | |
| MM22 | • | • | • | • | | • | • | • | |
| MM23 | | | | • | | | • | • | |
| MM24 | • | • | • | • | | | • | • | |
| MM25 | • | • | | • | | • | • | • | |
| MM26 | • | • | • | • | • | • | • | • | |
| MM27 | • | | • | • | | • | • | • | |
| MM28 | • | • | • | • | | • | • | • | • |
| MM29 | • | • | • | • | | • | • | • | |
| MM30 | • | • | • | • | | • | • | • | |
| MM31 | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| MM32 | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| MM33 | • | • | • | • | • | • | • | • | |
| MM34 | • | • | • | • | | • | • | • | |
| MM35 | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| MM36 | • | • | • | • | • | • | • | • | |
| MM37 | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| MM38 | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| MM39 | • | • | • | • | | • | • | • | |
| MM40 | • | • | • | • | | • | • | • | |
| MM41 | • | • | • | • | | • | • | • | |
| Total | 32 | 28 | 26 | 34 | 11 | 29 | 41 | 41 | 11 |

Dos 41 MMs, 32 mencionam a dimensão "**peças e cultura**". No contexto de "peças", termos como sociedade, trabalhador, produtor, fornecedor, recursos humanos e cliente são citados. Dezenove fazem menção a essa dimensão, relacionando-a a peças com experiência, competências e habilidades em tecnologias. Em onze, a dimensão "cultura" é destacada como parte fundamental da implementação, associada ao valor e ao poder das peças. Inclui trabalho em equipe, cultura de inovação, gestão e criação de conhecimento, melhoria contínua, desenvolvimento de competências e a abertura dos funcionários para as novas tecnologias e autonomia para decisões. Um exemplo é o de Gökalp e Martinez (2022) no qual esta dimensão está relacionada à gestão da força de trabalho e enfatiza que a mudança cultural deve ser implementada antes do início da transformação dos processos.

A dimensão "**estratégia**" é recorrente em 28 modelos e engloba investimentos em tecnologias, avaliação do nível atual de maturidade em um contexto específico e identificação de pontos fortes, fracos e oportunidades. Aborda a harmonização da I4.0 com a estratégia corporativa, a gestão eficaz de recursos para a execução de ações e a adaptação do modelo de negócios para atender aos requisitos da I4.0.

A dimensão “**produtos/serviços**” surge em 26 MMs e se relacionam com produtos customizados, com sistemas inteligentes que possibilitam aquisição de dados em tempo real, permitindo a comunicação constante com os clientes, com a fábrica e com os processos ao longo da cadeia de valor (Rafael *et al.*, 2020; Santos & Martinho, 2020). Aborda a integração de produtos a outros recursos e sistemas por meio de sua digitalização, tratando da flexibilidade de reconfiguração dos produtos e visando sua individualização.

“**Processos/operações**” é amplamente abordada (34 MMS) e se relaciona com tecnologias, gestão dos processos por meio da digitalização. Investiga como os dados são coletados, compartilhados e gerenciados e englobando descentralização, digitalização de processos e a promoção da colaboração interdisciplinar e interdepartamental. Alguns autores a denominam como “transformação digital de processos” (Gökalp & Martinez, 2022).

A “**governança**” (11 modelos) é reconhecida como um impulsionador da transformação, devido à disposição da alta administração em apoiar e liderar iniciativas de transformação digital, bem como à alocação adequada de recursos. Engloba aspectos externos, como conformidade com leis trabalhistas, questões de propriedade intelectual, padronização de tecnologias e definição de padrões emergentes de tecnologia. Ela também envolve a gestão e análise de dados, particularmente no que se refere a informações relevantes para as vendas aos clientes, como o uso e análise de *Big Data*. Beisekenov *et al.* (2022) não aborda esta dimensão diretamente, incorporando-a às demais. Por outro lado, para Felippes *et al.* (2022), ela faz parte da dimensão organizacional e é um elemento da subdimensão estratégia organizacional. A governança desempenha um papel fundamental na orientação e regulamentação das atividades de transformação digital, assegurando que elas estejam alinhadas com as estratégias e em conformidade com os requisitos legais e éticos.

A dimensão “**organização**” (29 MMs) está relacionada como a forma que as empresas conduzem suas atividades de digitalização e à estrutura organizacional que as sustenta. Dentro dessa dimensão, há uma sobreposição significativa com a dimensão estratégia, considerando o quão alinhado estão as estratégias das empresas com as práticas da I4.0. Além disso, transformação digital, adaptação de modelos de negócios, estilo de liderança, investimentos em tecnologia e inovação também são contemplados. Essa dimensão é fundamental para entender

como as empresas estão estruturadas internamente para abraçar a transformação digital e como suas estratégias estão alinhadas com a I4.0, considerando aspectos relacionados à governança e conformidade regulatória.

A "**segurança**" é um componente intrínseco em todos os modelos, embora muitas vezes seja tratada de maneira implícita. Para ilustrar, no MM de Bukowski (2019), essa dimensão é considerada em todas as demais dimensões, como precisão, clareza, consistência, plausibilidade e rastreabilidade, destacando a necessidade de proteção de dados e sistemas na era da I4.0.

Ressalta-se que a "**tecnologia**" é uma dimensão presente, mesmo que sob diferentes nomenclaturas, abrangendo digitalização, fábrica do futuro, fábricas inteligentes, suporte digital, etc. Essa dimensão está relacionada à aplicação de tecnologias para melhorar a eficiência da comunicação e das operações, incluindo a comunicação entre máquinas (M2M). Além disso, é comum que a tecnologia seja integrada a outras dimensões, como digitalização de produtos, processos e gestão digital (Basl & Doucek, 2019). Destaca-se o modelo de Beisekenov et al. (2022), uma vez que a tecnologia está inserida nas dimensões, ou seja, nos critérios estabelecidos para cada dimensão, em vez de ser abordada separadamente.

"**Criação de valor**" (11 MMs) aborda a capacidade em gerar valor a partir dos dados coletados. Essa dimensão é fundamental para que a organização compreenda o contexto em que está inserida para desenvolver estratégias robustas, previsões de manutenção precisas, além de atender às expectativas dos clientes, entre outros aspectos críticos (Colli *et al.*, 2019). Uma exceção é o MM de Beisekenov *et al.* (2022), que trata esta dimensão de forma integrada às demais. Isso reflete a ideia de que a capacidade de criar valor está relacionada à maturidade em outras áreas, como tecnologia, processos, segurança e governança. Ela ressalta a importância da transformação digital não apenas como um fim em si mesma, mas como um meio para melhorar a capacidade da organização de agregar valor aos seus produtos e processos, impulsionando sua competitividade e sucesso.

As dimensões identificadas demonstram que a tecnologia é o eixo central da I4.0, afinal, foi a evolução tecnológica que despertou esse conceito. Para o público externo, a maturidade em I4.0 é percebida por meio da sofisticação da tecnologia e da competência em operá-la. Ao analisar as dimensões, é possível observar muitas variáveis que não representam a tecnologia

propriamente dita. Uma empresa, por exemplo, pode demonstrar maturidade nas dimensões não tecnológicas sem ter maturidade nas tecnologias 4.0. Por outro lado, o que se observa nos modelos é que dificilmente a maturidade no uso e na aplicação das tecnologias 4.0 é alcançada sem o suporte das dimensões não tecnológicas, que fornecem suporte estratégico, humano e organizacional para garantir a prontidão para a I4.0. Assim, é possível inferir que as dimensões não tecnológicas são habilitadoras da tecnologia.

Os modelos também preveem a utilização de escalas para atribuir pontuações para cada item de avaliação. Porém, eles diferem na forma como os dados são coletados. Grande parte dos modelos dispõe de questionários que podem ser respondidos de forma remota e ainda funcionar como um instrumento de auto avaliação. Bibby e Dehe (2018) e Sjödin *et al.* (2018) sugerem a avaliação por meio de *workshops*, tirando proveito da discussão gerada entre os participantes e proporcionando a avaliação em grupo; ou ainda por meio de entrevistas (Ramanathan; Samaranayake, 2022; Wagire *et al.*, 2021) para que o entrevistador forneça orientação para a avaliação e também colete evidências que justificam o desempenho.

A forma de analisar a maturidade irá depender do objetivo da avaliação. Por exemplo, se a intenção é analisar a maturidade de várias empresas, são utilizadas ferramentas estatísticas para obter uma avaliação global. Se a intenção é um diagnóstico individual, os MMs adotam aritmética simples, algumas vezes incorporando a atribuição de pesos conforme a importância da dimensão. Como instrumento de avaliação individual, pode-se destacar o modelo Caiado *et al.* (2021), que propôs uma inovação, pois adotaram a lógica *fuzzy* como uma maneira de lidar com as imprecisões presentes em avaliações por julgamento pessoal.

4. SÍNTESE DOS MODELOS E AGENDA DE PESQUISA

A Tabela 4 sintetiza os achados e se apresenta como um quadro de referência para auxiliar na adoção ou no desenvolvimento de novos MMs. Os modelos apresentaram de 0 a 7 níveis de maturidade, e o Quadro 4 os condensou em seis, sugerindo uma avaliação mais objetiva. Em relação às dimensões, sugere-se 9, com governança e organização dentro da dimensão estratégia, sendo coerente com os modelos estudados.

Tomando como base as características limitações dos MMs, é apresentada uma agenda de pesquisa.

- **Métodos científicos.** Há predominância de métodos qualitativos (estudos de caso), considerando a opinião de especialistas da empresa para responderem questionários e entrevistas. Nesses casos, a quantificação do desempenho está sujeita à subjetividade e os critérios de avaliação são considerados de forma independente, como se a interação deles não influenciasse no desempenho global. Futuras pesquisas podem adotar ferramentas mais sofisticadas para atenuar esses problemas.

Tabela 4
Quadro referência

| Níveis | Dimensões | | | | | | |
|----------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| | Estratégia | Pessoas/Cultura | Processos/Operações | Produtos/Serviços | Segurança | Tecnologia | Criação de Valor |
| 1- Inexistente | Não existe uma estratégia para a I4.0. | Sem abertura à inovação e acesso às tecnologias 4.0. Pessoas não possuem experiência, competências e habilidades para as tecnologias nem autonomia para tomar decisões. | Não há descentralização, digitalização de processos/operações e colaboração interdisciplinar e interdepartamental. | Não há individualização de produtos/serviços e nem interação com outros sistemas. | Não há preocupação com a segurança dos dados. | Nenhuma utilização de tecnologias 4.0. | Nenhum valor é criado a partir de dados gerados em meio tecnológico. |
| 2- Iniciante | Estratégias pontuais para I4.0. | Iniciativas pontuais de abertura à inovação e acesso as tecnologias. Pessoas possuem pouca experiência, competência e habilidades para as tecnologias 4.0. | Existe pouca utilização de tecnologias para aumentar a eficiência da comunicação e das operações/processos. | Já existe individualização de produtos/serviços, mas não há interação com outros sistemas. | Pouca preocupação com a segurança dos dados. | Existem algumas tecnologias 4.0 que são usadas isoladamente. | Os dados são coletados e disponibilizados para eventual utilização. |

| Níveis | Dimensões | | | | | | |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| | Estratégia | Pessoas/Cultura | Processos/Operações | Produtos/Serviços | Segurança | Tecnologia | Criação de Valor |
| 3- Intermediário | A estratégia de transformação foi iniciada e existe um roteiro. | Existem ações e treinamento para abertura à inovação e acesso as tecnologias. Pessoas possuem competências para as novas tecnologias e certa autonomia para tomada decisões. | Existe utilização de tecnologias para aumentar a eficiência da comunicação e das operações/processos, incluindo a comunicação máquina-máquina. | Há individualização de produtos/serviços e interação com outros sistemas. | Existe uma preocupação considerável com a segurança dos dados, mas ainda não pode garantir a segurança em todos os casos. | Existem diferentes tecnologias que são usadas com alguma integração de sistemas, monitoramento, simulações, precisão e automação de processos. | Os dados são coletados e compartilhados de acordo com a necessidade dos clientes. |
| 4- Experiente | Estratégia focada nas ações transformacionais voltadas para I4.0, na alocação de recursos e investimentos e na abertura à inovação. | Ações e treinamento para abertura à inovação e acesso as tecnologias. Pessoas possuem alguma experiência e competências para as novas tecnologias, e certa autonomia para decisões. | Processos internos para a digitalização, compartilhamento e gerenciamento dos dados. Processos/operações são descentralizados e há interdisciplinaridade de entre departamentos. | É experiente na individualização de produtos/serviços e interação com outros sistemas. | Dados são armazenados e processados de forma segura. | É experiente na utilização de tecnologias que são usadas com integração de sistemas, monitoramento, simulações, precisão e automação de processos. | Dados são analisados para capturar informações valiosas para melhoria do negócio. |

| Níveis | Dimensões | | | | | | |
|-----------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Estratégia | Pessoas/Cultura | Processos/Operações | Produtos/Serviços | Segurança | Tecnologia | Criação de Valor |
| 5- Especialista | A estratégia já foi aplicada em projetos concretos. | Ações e treinamento para abertura à inovação e acesso as tecnologias. Pessoas possuem competências para as novas tecnologias e autonomia completa para tomada decisões. | Processos/operações internos possuem um gerenciamento voltado para digitalização, compartilhamento e gerenciamento dos dados. Processos/operações são descentralizados e há interdisciplinaridade de entre os departamentos. | Ocorre individualização de produtos/serviços e interação com outros sistemas. Os processos internos são alinhados com as tecnologias 4.0. | Dados são armazenados e processados de forma segura e a empresa já tem competência reconhecida nisso. | Pode ser considerada especialista na utilização de tecnologias para integração de sistemas, monitoramento, simulações, precisão e automação de processos. | Decisões são executadas autonomamente com base em dados automatizados e sincronizados. |
| 6- Avançado | Adaptação contínua e transformação dos modelos de negócios. | Compartilhamento de conhecimento entre empresas, valorização das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC). Pessoas possuem competências para uso das tecnologias e plena autonomia. | Processos/operações são descentralizados, interdisciplinaridade de entre os departamentos e constante busca pela melhoria e transformação dos processos/operações | Ocorre individualização de produtos/serviços e interação com outros sistemas. Processos internos são alinhados com as tecnologias. Há uma busca constante para a melhoria de produtos/serviços 4.0. | Dados são armazenados e processados de forma segura e há uma melhoria constante na segurança dos dados, tornando a empresa referência. | Referência na utilização de tecnologias para integração de sistemas, monitoramento, simulações, precisão e automação de processos. | Decisões são executadas autonomamente com base em dados automatizados e sincronizados, além de buscar a melhoria contínua pela criação de valor. |

- **MMs customizados versus universais.** Há modelos focados em empresas específicas e/ou áreas funcionais; e modelos genéricos que trazem comparação entre setores, surgindo oportunidades para pesquisas futuras analisarem esse *tradeoff* entre as vantagens de modelos genéricos *versus* específicos. Quando se considera o setor de serviços, há uma inadequação de algumas dimensões propostas. Portanto, o desenvolvimento de modelos específicos pode ser

uma oportunidade a partir do surgimento de termos como *Healthcare 4.0*, *Construction 4.0*, *Agriculture 4.0* e *Banking 4.0*.

- **Tecnologias da I4.0.** Os MM focam em tecnologias específicas, sem necessariamente considerarem todas as possibilidades tecnológicas sob o rótulo da I4.0. Nesse sentido, sugere-se que a avaliação da dimensão “tecnologia” possa ser atualizada continuamente, de forma a acompanhar a evolução tecnológica e incluir as inovações.

- **Níveis e dimensões.** Futuras pesquisas podem compreender se um número maior ou menor de níveis explica adequadamente a maturidade da I4.0. Algumas dimensões foram pouco exploradas (criação de valor e a governança), surgindo oportunidades para verificar se elas contribuem para uma avaliação completa ou se elas se tornam vagas e distantes do objetivo de avaliação.

5. CONCLUSÃO

A transformação digital está impulsionando uma onda de mudanças significativas no cenário corporativo. Nesse contexto, os MM para a I4.0 assumem um papel crucial ao oferecerem orientação e direcionamento às organizações que buscam navegar por essa transformação. A maioria desses modelos é aplicada por meio de questionários padronizados, que, ao serem preenchidos, fornecem uma avaliação do estágio atual de maturidade da organização e, em seguida, oferecem um conjunto de recomendações específicas para aprimoramento.

No entanto, é relevante notar que a maioria dos modelos d tem como foco principal as empresas do setor de manufatura. Essa concentração de esforços resultou em uma lacuna notável, pois a necessidade de MMs aplicáveis a uma ampla variedade de organizações, incluindo aquelas que prestam serviços, ainda não foi plenamente atendida.

Portanto, fica evidente a relevância contínua da pesquisa em MM para a I4.0, com um foco particular na expansão desses modelos para se adequarem às diversas organizações, incluindo as empresas de serviços. Esse é um campo promissor que oferece oportunidades para o desenvolvimento de abordagens mais inclusivas e abrangentes para avaliar e orientar a maturidade no contexto da I4.0.

Este artigo apresentou uma síntese das dimensões e níveis dos MM para I4.0 e muitos desses modelos se baseiam em modelos da indústria, extraídos de literatura empresarial, como: Acatech, PwC Industry 4.0, Modelo de Maturidade de Integração de Sistemas I4.0 (SIMMI 4.0) e IMPULS Industrie 4.0. Assim, este trabalho também incorpora as dimensões de modelos da indústria, contribuindo para um quadro de referência mais abrangente, baseado em pesquisa científica.

Os resultados deste estudo oferecem também contribuições. Primeiramente, a visão panorâmica das pesquisas podem guiar futuros pesquisadores a desenvolver ou aplicar modelos em contextos diversos, proporcionando uma direção sobre o tipo de modelo que pode ser mais apropriado em diferentes cenários. Segundo, os achados deste estudo têm o potencial de orientar tanto pesquisadores quanto tomadores de decisão no que diz respeito às dimensões e níveis de maturidade a serem considerados ao adotar ou desenvolver um MM para a I4.0. É fundamental reconhecer que as dimensões universais, como estratégia, liderança, consumidores, produtos, operações, cultura, pessoas, governança, segurança e tecnologia, desempenham um papel central na maioria dos modelos analisados. Por último, este estudo também destaca uma lacuna importante na literatura: a falta de investigações voltadas para a sistematização de uma abordagem integrada na criação de um modelo genérico. Embora os modelos tenham aplicabilidade em diversos contextos, a adaptação desses pode ser necessária, considerando as nuances específicas de cada situação. Portanto, há espaço para pesquisas futuras desenvolverem abordagens mais integradas e abrangentes para avaliar a maturidade na I4.0.

Embora este estudo tenha oferecido contribuições, é igualmente relevante destacar algumas limitações que, representam oportunidades para pesquisas futuras. Uma delas reside no fato de que a RSL se concentrou exclusivamente em duas bases de dados, a ISI *Web of Science* e *Scopus*. A inclusão de outras fontes ou a exploração de diferentes *strings* tem potencial de ampliar o alcance dos artigos selecionados, proporcionando uma visão mais abrangente. Segundo, a ausência de uma comparação direta entre os MMs acadêmicos e os da indústria. Essa comparação pode revelar *insights* sobre como os modelos acadêmicos se alinham com as práticas e necessidades reais da indústria. Essa lacuna fornece uma justificativa

para pesquisas subsequentes, examinando em detalhes como os modelos acadêmicos e industriais se relacionam e onde podem ocorrer discrepâncias.

REFERÊNCIAS

- Aagaard, A., Presser, M., Collins, T., Beliatis, M., Skou, A. K., & Jakobsen, E. M. (2021). The Role of Digital Maturity Assessment in Technology Interventions with Industrial Internet Playground. *Electronics*, *10*(10), 1134. <https://doi.org/10.3390/electronics10101134>
- Amaral, A., & Peças, P. (2021). A Framework for Assessing Manufacturing SMEs Industry 4.0 Maturity. *Applied Sciences*, *11*(13), 6127. <https://doi.org/10.3390/app11136127>
- Asdecker, B., & Felch, V. (2018). Development of an Industry 4.0 maturity model for the delivery process in supply chains. *Journal of Modelling in Management*, *13*(4), 840–883. <https://doi.org/10.1108/JM2-03-2018-0042>
- Ávila-Bohórquez, J. H., & Gil-Herrera, R. de J. (2022). Proposal and Validation of an Industry 4.0 Maturity Model for SMEs. *Journal of Industrial Engineering and Management*, *15*(3), 433–454. <https://doi.org/10.3926/jiem.3673>
- Basl, J., & Doucek, P. (2019). A metamodel for evaluating enterprise readiness in the context of industry 4.0. *Information (Switzerland)*, *10*(3). <https://doi.org/10.3390/info10030089>
- Beisekenov, I., Suleiman, Z., Tokbergenova, A., Shaikholla, S., Dikhanbayeva, D., El-Thalji, I., Emiris, D., & Turkyilmaz, A. (2022). Maturity Assessment of Industry 4.0 Implementation in Kazakhstani and Norwegian Oil and Gas Contexts. *Journal of Industrial Integration and Management*, *7*(4), 455–477. <https://doi.org/10.1142/S2424862222500191>
- Bibby, L., & Dehe, B. (2018). Defining and assessing industry 4.0 maturity levels—case of the defence sector. *Production Planning and Control*, *29*(12), 1030–1043.
- Bukowski, L. (2019). Logistics decision-making based on the maturity assessment of imperfect knowledge. *Engineering Management in Production and Services*, *11*(4), 65–79. <https://doi.org/10.2478/emj-2019-0034>
- Caiado, R. G. G., Scavarda, L. F., Gavião, L. O., Ivson, P., Nascimento, D. L. de M., & Garza-Reyes, J. A. (2021). A fuzzy rule-based industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management. *International Journal of Production Economics*, *231*(July 2020). <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107883>
- Castelo-Branco, I., Oliveira, T., Simões-Coelho, P., Portugal, J., & Filipe, I. (2022). Measuring the fourth industrial revolution through the Industry 4.0 lens: The relevance of resources, capabilities and the value chain. *Computers in Industry*, *138*, 103639. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103639>
- Chaopaisarn, P., & Woschank, M. (2021). Maturity Model Assessment of SMART Logistics for SMEs. *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*, *20*(2). <https://doi.org/10.12982/CMUJNS.2021.025>
- Chonsawat, N., & Sopadang, A. (2021). Smart SMEs 4.0 Maturity Model to Evaluate the Readiness of SMEs Implementing Industry 4.0. *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*, *20*(2), 1–13. <https://doi.org/10.12982/CMUJNS.2021.027>
- Çınar, Z. M., Zeeshan, Q., & Korhan, O. (2021). A Framework for Industry 4.0 Readiness and

- Maturity of Smart Manufacturing Enterprises: A Case Study. *Sustainability*, 13(12), 6659. <https://doi.org/10.3390/su13126659>
- Colli, M., Berger, U., Bockholt, M., Madsen, O., Møller, C., & Wæhrens, B. V. (2019). A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era. *Annual Reviews in Control*, 48, 165–177. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.06.001>
- de Jesus, C., & Lima, R. M. (2020). Literature search of key factors for the development of generic and specific maturity models for industry 4.0. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 17). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app10175825>
- de Paula Ferreira, W., Armellini, F., de Santa-Eulalia, L. A., & Thomasset-Laperrière, V. (2022). A framework for identifying and analysing industry 4.0 scenarios. *Journal of Manufacturing Systems*, 65(September), 192–207. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.09.002>
- de Souza, S. S., Santiago, S. B., de Amorim Francisco Soares Filho, A., de Mendonça, M. B., & Oliveira, F. L. (2020). Metanalysis of industry 4.0 maturity models. *Interciencia*, 45(8), 397–401.
- Dikhanbayeva, D., Shaikholla, S., Suleiman, Z., & Turkyilmaz, A. (2020). Assessment of Industry 4.0 Maturity Models by Design Principles. *Sustainability*, 12(23), 9927. <https://doi.org/10.3390/su12239927>
- Dutta, G., Kumar, R., Sindhvani, R., & Singh, R. K. (2020). Digital transformation priorities of India's discrete manufacturing SMEs – a conceptual study in perspective of Industry 4.0. *Competitiveness Review*, 289–314. <https://doi.org/10.1108/CR-03-2019-0031>
- Elibal, K., & Özceylan, E. (2020). A systematic literature review for industry 4.0 maturity modeling: state-of-the-art and future challenges. *Kybernetes*, ahead-of-p(ahead-of-print). <https://doi.org/10.1108/K-07-2020-0472>
- Facchini, F., Olésków-Szłapka, J., Ranieri, L., & Urbinati, A. (2020). A maturity model for logistics 4.0: An empirical analysis and a roadmap for future research. *Sustainability (Switzerland)*, 12(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/SU12010086>
- Felippes, B., da Silva, I., Barbalho, S., Adam, T., Heine, I., & Schmitt, R. (2022). 3D-CUBE readiness model for industry 4.0: technological, organizational, and process maturity enablers. *Production and Manufacturing Research*, 10(1), 875–937. <https://doi.org/10.1080/21693277.2022.2135628>
- Gajsek, B., Marolt, J., Rupnik, B., Lerher, T., & Sternad, M. (2019). Using maturity model and discrete-event simulation for industry 4.0 implementation. *International Journal of Simulation Modelling*, 18(3), 488–499. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM18\(3\)489](https://doi.org/10.2507/IJSIMM18(3)489)
- Gallego-García, S., Groten, M., & Halstrick, J. (2022). Integration of Improvement Strategies and Industry 4.0 Technologies in a Dynamic Evaluation Model for Target-Oriented Optimization. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(3), 1–21. <https://doi.org/10.3390/app12031530>
- Ganzarain, J., & Errasti, N. (2016). Three stage maturity model in SME's toward industry 4.0. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(5), 1119. <https://doi.org/10.3926/jiem.2073>
- Gökalp, E., & Martinez, V. (2022). Digital transformation maturity assessment: development of the digital transformation capability maturity model. *International Journal of Production*
-  Revista Gestão & Tecnologia (Journal of Management & Technology), v. 24, n.5, p.154-181, 2024 178

- Research*, 60(20), 6282–6302. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1991020>
- Herceg, I. V., Kuč, V., Mijušković, V. M., & Herceg, T. (2020). Challenges and driving forces for industry 4.0 implementation. *Sustainability (Switzerland)*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/su12104208>
- Honorato, C., & De Melo, F. C. L. (2023). Industry 4.0: The Case-Study of a Global Supply Chain Company. *Journal of Industrial Integration and Management*, 8(1), 131–148. <https://doi.org/10.1142/S2424862222500269>
- Kırmızı, M., & Kocaoglu, B. (2022). Digital transformation maturity model development framework based on design science: case studies in manufacturing industry. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 33(7), 1319–1346. <https://doi.org/10.1108/JMTM-11-2021-0476>
- Lin, T. C., Wang, K. J., & Sheng, M. L. (2020). To assess smart manufacturing readiness by maturity model: a case study on Taiwan enterprises. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(1), 102–115. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1699255>
- Mittal, S., Khan, M. A., Purohit, J. K., Menon, K., Romero, D., & Wuest, T. (2020). A smart manufacturing adoption framework for SMEs. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1555–1573. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1661540>
- Moura, L. R., & Kohl, H. (2020). Maturity Assessment in Industry 4.0 - A Comparative Analysis of Brazilian and German Companies. *Emerging Science Journal*, 4(5), 365–375. <http://marefateadyan.nashriyat.ir/node/150>
- Naeem, H. M., & Garengo, P. (2022). The interplay between industry 4.0 maturity of manufacturing processes and performance measurement and management in SMEs. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 71(4), 1034–1058. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-09-2021-0552>
- Pacchini, A. P. T., Lucato, W. C., Facchini, F., & Mummolo, G. (2019). The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0. *Computers in Industry*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103125>
- Peukert, S., Treber, S., Balz, S., Haefner, B., & Lanza, G. (2020). Process model for the successful implementation and demonstration of SME-based industry 4.0 showcases in global production networks. *Production Engineering*, 14(3), 275–288. <https://doi.org/10.1007/s11740-020-00953-0>
- Pirola, F., Cimini, C., & Pinto, R. (2020). Digital readiness assessment of Italian SMEs: a case-study research. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(5), 1045–1083. <https://doi.org/10.1108/JMTM-09-2018-0305>
- Rafael, L. D., Jaione, G. E., Cristina, L., & Ibon, S. L. (2020). An Industry 4.0 maturity model for machine tool companies. *Technological Forecasting and Social Change*, 159(March). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120203>
- Rahamaddulla, S. R. Bin, Leman, Z., Baharudin, B. T. H. T. Bin, & Ahmad, S. A. (2021). Conceptualizing Smart Manufacturing Readiness-Maturity Model for Small and Medium Enterprise (SME) in Malaysia. *Sustainability*, 13(17), 9793. <https://doi.org/10.3390/su13179793>
- Ramanathan, K., & Samaranayake, P. (2022). Assessing Industry 4.0 readiness in

- manufacturing: a self-diagnostic framework and an illustrative case study. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 33(3), 468–488. <https://doi.org/10.1108/JMTM-09-2021-0339>
- Sadiq, S., Amjad, M. S., Rafique, M. Z., Hussain, S., Yasmeen, U., & Khan, M. A. (2021). An integrated framework for lean manufacturing in relation with blue ocean manufacturing - A case study. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123790. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123790>
- Santos-Neto, J. B. S. dos, & Costa, A. P. C. S. (2019). Enterprise maturity models: a systematic literature review. *Enterprise Information Systems*, 13(5), 719–769. <https://doi.org/10.1080/17517575.2019.1575986>
- Santos, R. C., & Martinho, J. L. (2019). An Industry 4.0 maturity model proposal. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(5), 1023–1043. <https://doi.org/10.1108/JMTM-09-2018-0284>
- Simetinger, F., & Zhang, Z. (2020). Deriving secondary traits of industry 4.0: A comparative analysis of significant maturity models. *Systems Research and Behavioral Science*, 37(4), 663–678. <https://doi.org/10.1002/sres.2708>
- Sjödin, D. R., Parida, V., Leksell, M., & Petrovic, A. (2018). Smart Factory Implementation and Process Innovation: A Preliminary Maturity Model for Leveraging Digitalization in Manufacturing. Moving to smart factories presents specific challenges that can be addressed through a structured approach focused on people, p. *Research Technology Management*, 61(5), 22–31. <https://doi.org/10.1080/08956308.2018.1471277>
- Stawiarska, E., Szwajca, D., Matusek, M., & Wolniak, R. (2021). Diagnosis of the maturity level of implementing industry 4.0 solutions in selected functional areas of management of automotive companies in poland. *Sustainability (Switzerland)*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/su13094867>
- Sütöová, A., Šooš, L., & Kóča, F. (2020). Learning needs determination for industry 4.0 maturity development in automotive organisations in Slovakia. *Quality Innovation Prosperity*, 24(3), 122–139. <https://doi.org/10.12776/QIP.V24I3.1521>
- Tranfield, D., Denyer, D., Smart, P., & Al, T. et. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- Ünal, C., Sungur, C., & Yildirim, H. (2022). Application of the Maturity Model in Industrial Corporations. *Sustainability (Switzerland)*, 14(15), 1–25. <https://doi.org/10.3390/su14159478>
- Vasconcelos, Luis Rigato Junior, Paulo Gobo, Rodrigues, F. (2021). An Industry 4.0 Maturity Model Applied to the automotive supply chain. *Revista Gestão & Tecnologia*, 21, n. 4, 230–258.
- Wagire, A. A., Joshi, R., Rathore, A. P. S., & Jain, R. (2021). Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice. *Production Planning and Control*, 32(8), 603–622. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1744763>
- Wagire, A. A., Rathore, A. P. S., & Jain, R. (2020). Analysis and synthesis of Industry 4.0 research landscape: Using latent semantic analysis approach. In *Journal of Manufacturing Technology Management* (Vol. 31, Issue 1, pp. 31–51). Emerald Group Publishing Ltd.

- <https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2018-0349>
- Wang, Q., & Waltman, L. (2016). Large-scale analysis of the accuracy of the journal classification systems of Web of Science and Scopus. *Journal of Informetrics*, 10(2), 347–364. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2016.02.003>
- White, M. D., & Marsh, E. E. (2006). Content Analysis: A Flexible Methodology. *Library Trends*, 55(1), 22–45. <https://doi.org/10.1353/lib.2006.0053>
- Závodská, Z., & Závadský, J. (2020). Quality managers and their future technological expectations related to Industry 4.0. *Total Quality Management & Business Excellence*, 31(7–8), 717–741. <https://doi.org/10.1080/14783363.2018.1444474>
- Zuehlke, D. (2010). SmartFactory—Towards a factory-of-things. *Annual Reviews in Control*, 34(1), 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2010.02.008>