

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL ESCOLA DE
ENGENHARIA
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**PRESSUPOSTOS PARA IMPLANTAÇÃO E GESTÃO DE PROJETOS
ORIENTADOS PARA INDÚSTRIA 4.0**

LEANDRO KAPPES

Porto Alegre

2023

LEANDRO KAPPES

**PRESSUPOSTOS PARA IMPLANTAÇÃO E GESTÃO DE PROJETOS
ORIENTADOS PARA INDÚSTRIA 4.0**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção na Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Profissional, na área de concentração em Sistemas de Produção.

Orientador: Prof. Néstor Fabián Ayala, Dr.

Porto Alegre

2023

Leandro Kappes

**PRESSUPOSTOS PARA IMPLANTAÇÃO E GESTÃO DE PROJETOS
ORIENTADOS PARA INDÚSTRIA 4.0**

Esta dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Profissional, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Néstor Fabián Ayala, Dr.
Orientador PMPEP/UFRGS

Prof. Ricardo Augusto Cassel, Dr.
Coordenador PMPEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Ricardo Augusto Cassel, Dr. (UFRGS)

Prof. Jonatas Ost Scherer, Dr. (UFRGS)

Prof. Ângelo Sant'Anna, Dr. (UFBA)

Dedicatória

Dedico esta dissertação postumamente aos meus avós maternos, que na falta de meus pais assumiram a responsabilidade pela minha educação, deixando sempre muito claro que somente o conhecimento dignifica, eleva e liberta o homem.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos,

A Deus, pois apesar de estar redescobrimo Ele todos os dias, sei que sempre está comigo em meu foro mais íntimo, mesmo quando não o percebo.

A Joelma minha esposa querida e aos meus filhos Gustavo e Nicolás, que em alguns momentos tiveram que ter paciência para conviver com minha ausência para que fosse possível me dedicar aos estudos.

A todos que passaram por minha vida, pois não tenho dúvidas que em muitos momentos fui orientado por gigantes.

Ao meu grande mestre e orientador, o professor Néstor Fabián Ayala, Dr. que quando parecia que ficaria complicado, suscitava novos *insights* trazendo luz a este trabalho.

A todos os colegas e professores do PMPEP que conheci durante este período, que de alguma forma contribuíram no meu processo de aprendizagem e crescimento, pois mesmo com aulas remotas, foi um privilégio assistir as aulas com grandes mestres da engenharia de produção. Quanto aos colegas, tenho certeza de que alguns levarei para toda a vida, pois evoluímos em interesses comuns e na amizade.

Ao Ricardo Costa, Diretor Comercial da Allcance Tecnologia, que de forma solícita, foi fundamental para que eu tivesse acesso a vários dos entrevistados, assim como pelas contribuições em torno do tema de pesquisa.

A todos os técnicos, gestores e diretores que se prontificaram a reservar parte do seu tempo para participar da pesquisa de campo deste trabalho.

A secretaria do PMPEP que sempre dirimiu rapidamente minhas dúvidas.

Aos examinadores da banca, pelo tempo disponibilizado e contribuições ao trabalho.

E por fim, a minha terceira mãe, a “filosofia”, que me ensinou a rejeitar a presunção do saber, e a querer continuar aprendendo mais e mais a cada dia.

RESUMO

A indústria contemporânea está em constante transformação, e as empresas que desejam se manter competitivas precisam ser protagonistas deste processo de transformação, ou então, se adaptar ao novo contexto que se apresenta. Neste sentido, a Indústria 4.0 (I4.0) fomentada na Alemanha em 2011, a partir da feira de Hannover, ainda é pouco conhecida e explorada, principalmente por pequenas e médias empresas (PMEs). Diante do exposto, esta dissertação pretende identificar quais barreiras impedem que as empresas evoluam neste processo e, assim, propor caminhos para superar estas barreiras. Primeiramente foram mapeadas as dificuldades encontradas por empresas, que passaram pelo processo de transformação digital, aplicando entrevistas semiestruturadas, separadas em dois grupos de perguntas. Os grupos deram origem aos dois artigos desta dissertação, cujos temas e objetivos são: (i) identificar quais pré-requisitos devem ser observados por PMEs que optarem pela implantação de soluções tecnológicas da I4.0, e propor um *roadmap* com o passo a passo para o processo de implantação baseado nas quatro dimensões *Smart* apresentadas por Frank et. al. (2019); (ii) identificar lacunas e oportunidades de melhoria no processo de gestão de implantação de soluções tecnológicas da I4.0, propondo um *roadmap* de gestão de implantação, além de quatro *frameworks* organizadas segundo as dimensões de aplicação propostas por Frank et. al. (2019). Os achados obtidos da análise das entrevistas do primeiro artigo apontam, para a falta de conhecimento das PMEs em torno do assunto, assim como um direcionamento no processo de transformação digital, que respeite as suas singularidades e estas barreiras são mais contundentes, do que as barreiras financeiras. Já o artigo dois, demonstra que as práticas de gestão de projetos de implantação de soluções tecnológicas utilizadas foram incipientes, pois a maioria das empresas sequer estruturou um planejamento básico.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Pequenas e Médias Empresas; Fatores de Decisão; Modelos de Maturidade; Roteiro de Implantação; Gestão de Projetos.

ABSTRACT

The contemporary industry is in constant transformation, and companies that wish to remain competitive need to be protagonists of this transformation process, or else adapt to the new context that presents itself. In this sense, Industry 4.0 (I4.0) promoted in Germany in 2011 from the Hannover fair, is still little known and explored, mainly by small and medium-sized companies (SMEs). Given the above, this dissertation has as main objective to identify which barriers prevent companies from evolving in this process, and thus, to propose ways to overcome these barriers. First, the difficulties encountered by companies that went through the digital transformation process were mapped, applying semi-structured interviews separated into two groups of questions. The groups originated the two articles of this dissertation whose themes and objectives are: (i) to identify which prerequisites must be observed by SMEs that opt for the implementation of I4.0 technological solutions, and to propose a roadmap with the step by step for the process implementation based on the four Smart dimensions presented by Frank et. al. (2019); (ii) identify gaps and opportunities for improvement in the I4.0 implementation management process, proposing an implementation management roadmap, in addition to four frameworks organized according to the application dimensions proposed by Frank et. al. (2019). The findings obtained from the analysis of the interviews in the first article point to the lack of knowledge of SMEs around the subject, as well as their direction in the digital transformation process that respects their singularities, and these are more forceful barriers than the ones of financial barriers. Article two demonstrates that project management practices for implementing technological solutions used were incipient, in which most companies did not even structure a basic plan.

Keywords: Industry 4.0; Small and Medium Enterprises; Decision Factors; Maturity Models; Deployment Roadmap; Project Management.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Desenho do planejamento da pesquisa | 17 |
| Figura 2.1 - Modelo conceitual de transformação digital e as quatro inteligências da I4.0 .. | 24 |
| Figura 2.2 - Modelo conceitual aplicado ao estudo | 30 |
| Figura 2.3 – <i>Framework</i> com a metodologia de pesquisa | 31 |
| Figura 2.4 – Modelo conceitual proposto para PMEs | 37 |
| Figura 3.1 - Modelo conceitual de gestão de implantação de I4.0 proposto | 76 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1.1 – Objetivos geral e específico da dissertação e artigos, lacunas e teses de apoio.... | 14 |
| Quadro 2.1 - Pesquisas de I4.0 no contexto das PMEs e suas respectivas dimensões <i>Smart</i> .. | 25 |
| Quadro 2.2 - Resumo dos dados da consulta preliminar | 33 |
| Quadro 2.3 - Resumo dos resultados encontrados na pesquisa 01 | 36 |
| Quadro 3.1 – Tecnologias da I4.0 nas quatro dimensões <i>Smart</i> | 63 |
| Quadro 3.2 - Modelos de avaliação analisados | 69 |
| Quadro 3.3 - Resumo dos resultados encontrados na pesquisa 02 | 75 |
| Quadro 3.4 - Proposta de <i>framework</i> para implantação da <i>Smart Manufacturing</i> | 83 |
| Quadro 3.5 - Proposta de <i>framework</i> p/ implantação do <i>Smart Product & Service System</i> .. | 84 |
| Quadro 3.6 - Proposta de <i>framework</i> para implantação do <i>Smart Supply Chain</i> | 85 |
| Quadro 3.7 - Proposta de <i>framework</i> para implantação do <i>Smart Working</i> | 86 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 TEMA E OBJETIVOS | 14 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA | 15 |
| 1.3 DELINEAMENTO DO ESTUDO | 16 |
| 1.3.1 Caracterização do método de pesquisa | 16 |
| 1.3.2 Método de trabalho | 17 |
| 1.4 DELIMITAÇÕES DO ESTUDO | 18 |
| 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 18 |
| 1.6 REFERÊNCIAS | 19 |
| 2. ARTIGO 1 – PRÉ-REQUISITOS PARA IMPLANTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 EM PEQUENAS E MÉDIAS EMPRESAS: UM ROTEIRO EM QUATRO DIMENSÕES | 21 |
| 2.1 Introdução | 22 |
| 2.2 Fundamentos teóricos | 23 |
| 2.2.1 As quatro dimensões <i>Smart</i> da I4.0 | 23 |
| 2.2.2 Investigando as dimensões <i>Smart</i> nas PMEs | 24 |
| 2.2.2.1 A <i>Smart Manufacturing</i> | 25 |
| 2.2.2.2 A <i>Smart Supply Chain</i> | 26 |
| 2.2.2.3 O <i>Smart Product & Service System</i> | 27 |
| 2.2.2.4 O <i>Smart Working</i> | 28 |
| 2.2.3 Análise de modelos de implantação de I4.0 para PMEs | 29 |
| 2.2.4 O processo de pensamento da TOC como lente para guiar um <i>roadmap</i> de I4.0 | 29 |
| 2.3 Método de pesquisa | 30 |
| 2.3.1 Seleção dos casos | 31 |
| 2.3.2 Instrumentos de pesquisa | 32 |
| 2.3.3 Coleta de dados | 32 |
| 2.3.4 Validade e confiabilidade | 34 |
| 2.3.5 Análise dos dados | 34 |
| 2.4 Resultados e discussões | 35 |
| 2.4.1 Por que mudar: definindo os objetivos da PME | 37 |
| 2.4.2 O que mudar: identificando as restrições | 38 |

| | |
|---|----|
| 2.4.3 Para o que mudar: definindo soluções | 39 |
| 2.4.3.1 Soluções tecnológicas para a <i>Smart Manufacturing</i> | 40 |
| 2.4.3.2 Soluções tecnológicas para o <i>Smart Product & Service System</i> | 41 |
| 2.4.3.3 Soluções tecnológicas para o <i>Smart Working</i> | 41 |
| 2.4.3.4 Soluções tecnológicas para a <i>Smart Supply Chain</i> | 41 |
| 2.4.4 Estabelecendo os pré-requisitos e planejando as ações | 42 |
| 2.4.4.1 Pré-requisitos e planejamento de ações para a <i>Smart Manufacturing</i> ... | 43 |
| 2.4.4.2 Pré-requisitos e planejamento de ações para o <i>Smart Product & Service System</i> | 45 |
| 2.4.4.3 Pré-requisitos e planejamento de ações para o <i>Smart Working</i> | 46 |
| 2.4.4.4 Pré-requisitos e planejamento de ações para a <i>Smart Supply Chain</i> | 46 |
| 2.4.5 Como gerenciar a mudança: pontos de orientação e controle | 47 |
| 2.4.6 Como medir e manter a mudança: avaliando o processo de implantação | 48 |
| 2.5 Conclusões | 49 |
| 2.5.1 Contribuições teóricas | 49 |
| 2.5.2 Implicações práticas | 50 |
| 2.5.3 Limitações e pesquisas futuras | 50 |
| 2.6 Referências | 51 |
| 2.7 Anexo A - Modelos analisados por Mittal et al. (2018) | 59 |
| 3. ARTIGO 2 – GESTÃO DE PROJETOS DE IMPLANTAÇÃO DE INDÚSTRIA | |
| 4.0: ROADMAPS PARA AS QUATRO DIMENSÕES SMARTS | 61 |
| 3.1 Introdução | 62 |
| 3.2 Fundamentos teóricos | 63 |
| 3.2.1 As quatro dimensões <i>Smart</i> da I4.0 | 63 |
| 3.2.1.1 A <i>Smart Manufacturing</i> na I4.0 | 64 |
| 3.2.1.2 O <i>Smart Product & Service System</i> na I4.0 | 65 |
| 3.2.1.3 A <i>Smart Supply Chain</i> na I4.0 | 65 |
| 3.2.1.4 O <i>Smart Working</i> na I4.0 | 66 |
| 3.2.2 Análise dos modelos de implantação de I4.0 | 67 |
| 3.2.3 Estruturando um <i>roadmap</i> de implantação de I4.0 | 70 |
| 3.3 Método de pesquisa | 71 |
| 3.3.1 Seleção dos casos | 71 |
| 3.3.2 Instrumentos de pesquisa | 72 |
| 3.3.3 Coleta de dados | 72 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.3.4 | Validade e confiabilidade | 73 |
| 3.3.5 | Análise dos dados | 73 |
| 3.4 | Resultados e discussões | 74 |
| 3.4.1 | Por que, o que e para o que mudar | 76 |
| 3.4.2 | Pré-requisitos para a implantação da I4.0 | 77 |
| 3.4.3 | Gestão do processo de implantação | 78 |
| 3.4.3.1 | Definição da equipe de projeto | 78 |
| 3.4.3.2 | Prospecção e validação de fornecedores | 78 |
| 3.4.3.3 | Análise de interface de infraestrutura | 79 |
| 3.4.3.4 | Definindo o escopo de projeto | 79 |
| 3.4.3.5 | Validação do novo processo | 80 |
| 3.4.4 | Avaliação e ajustes no projeto piloto | 80 |
| 3.4.5 | Implantação de soluções tecnológicas | 81 |
| 3.5 | Conclusões | 87 |
| 3.5.1 | Contribuições teóricas | 87 |
| 3.5.2 | Implicações práticas | 87 |
| 3.5.3 | Limitações e pesquisas futuras | 87 |
| 3.6 | Referências | 88 |
| 4. | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 93 |
| 4.1 | Conclusões | 94 |
| 4.2 | Sugestões de trabalhos futuros | 94 |
| 5. | APÊNDICES | 96 |
| 5.1 | Apêndice A - Formulário de consulta preliminar | 96 |
| 5.2 | Apêndice B - Questionário orientador do Artigo 01 | 98 |
| 5.3 | Apêndice C - Questionário orientador do Artigo 02 | 98 |

1. INTRODUÇÃO

A indústria contemporânea vem se transformando, a partir de novas proposições apresentadas na feira de Hannover na Alemanha em 2011 (KAGERMANN, 2013). E esta transformação, denominada de quarta revolução industrial, está fundamentado na digitalização dos processos de manufatura e está proporcionando um incremento significativo de eficiência nas organizações (FRANK, 2019), pois [...] “a velocidade em que ocorrem as inovações não tem precedente histórico. A possibilidade de bilhões de pessoas se comunicarem por dispositivos móveis, com poder de processamento, capacidade de armazenamento e acesso ao conhecimento, é ilimitada” (DUARTE, 2017, p. 31). Este novo modelo de inovação, também conhecido como Indústria 4.0 (I4.0), apesar de parecer um modelo disruptivo, trata-se na verdade de um processo de melhoria contínua acelerado com tecnologia disruptiva. Diferentemente das três revoluções anteriores, foi observado e diagnosticado antecipadamente, e essa é a primeira vez que os acontecimentos estão sendo previstos como tendências (HERMANN, 2015).

Segundo pesquisa do CNI, no Brasil, os investimentos no sentido de se implantar tecnologias da I4.0, ainda são pífios, salvo os investimentos realizados em indústrias de grande porte, em alguns segmentos específicos como o automotivo. Nessa perspectiva, a pesquisa foi realizada em 2021 com 1.691 empresas, sendo 684 pequenas, 607 médias e 400 grandes, na qual a falta de recursos financeiros representa 66% dos entraves internos das empresas, que desejam digitalizar seus processos. Soma-se a isto o fato de que 25% das empresas tem dificuldade de acesso a linhas de crédito (CNI, 2022). Contudo, a mesma pesquisa realizada em novembro de 2020 apontava que as perspectivas para 2022 eram promissoras, pois as empresas que adotaram os sistemas de conexão máquina-máquina, *big data* e inteligência artificial, durante a pandemia do Coronavírus lucraram em média 32% a mais que o período pré-pandemia. Este percentual é de 5 a 7% maior do que o informado por empresas, que não optaram pela implantação destas tecnologias. Ainda há um longo caminho a ser trilhado pelas empresas brasileiras, pois mais de 50% das empresas pesquisadas, nem mesmo conseguem acompanhar o ritmo de desenvolvimento de novas tecnologias disponibilizadas ao mercado CNI (2022).

Além dos entraves já mencionados na hora de decidir pela implantação deste novo sistemas produtivo, empresas de grande porte, em sua grande maioria, já possuem modelos de gestão e sistemas produtivos consolidados, mas, quando se trata de empresas de pequeno e


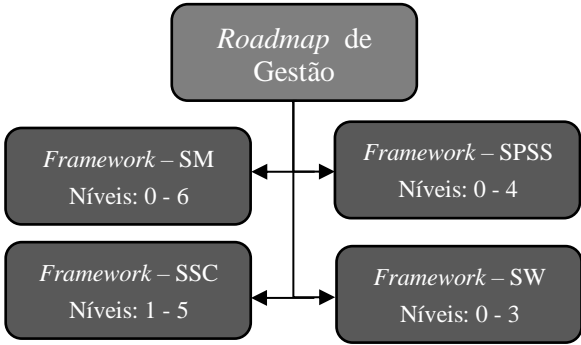
médio porte, estes mesmos modelos e sistemas, podem ainda ser incipientes, o que torna o contexto de implantação ainda mais complexo e desafiador (MITTAL, 2018; GHOBAKHLOO, 2021). Some-se a isto, ao grande desafio do mundo corporativo de ser competitivo em um mercado globalizado, em um país com alta carga tributária e, ainda carente de mão de obra especializada capaz de monitorar sistemas produtivos desenvolvidos com a utilização de *Cyber-physical Systems (CPS)*, *IoT*, inteligência artificial e outras tecnologias, que são algumas das tecnologias de entrada na I4.0 (CNI, 2022).

1.1 Tema e objetivos

O presente trabalho tem o seu tema inserido na área de concentração Engenharia de produção na sub área Sistemas de Produção, mais especificamente na sub área, tecnologias digitais para concepção da I4.0. O detalhamento do objetivo geral e específicos da dissertação e artigos, assim como as lacunas de pesquisa e teses de apoio são apresentados no Quadro 1.1.

Quadro 1.1 Objetivos geral e específico da dissertação e artigos, lacunas de pesquisas e teses de apoio

| DISSERTAÇÃO | | |
|--|--|--|
| OBJETIVOS | | FUNDAMENTOS TEÓRICOS |
| Geral | Específicos | Lacunas de Pesquisa e Teses de Apoio |
| Definir os pré-requisitos e modelo de gestão de projetos, que suportem o processo de implantação da Indústria 4.0, fornecendo uma ferramenta sob medida para cada empresa. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Caracterizar as tecnologias <i>Front-end</i> e tecnologias de base; ▪ Apresentar e discutir os modelos de maturidade (Ma), prontidão (Pr) e <i>roadmaps</i> (Ro) já desenvolvidos; ▪ Traçar os caminhos a serem percorridos. | <p>Pesquisa de Mittal et. al. (2018) detalhada no Anexo A, analisando os modelos (Ma/Pr/Ro) identificou as seguintes lacunas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ A necessidade de criação de um nível zero de maturidade nos modelos conhecidos; ▪ A importância do desenvolvimento de uma ferramenta de autoavaliação para ser aplicada durante o processo de implantação; ▪ A necessidade de desenvolver suporte sob medida, respeitando as singularidades de cada empresa. |
| | | Análise de lacunas em outras publicações com modelos de (Ma/Pr /Ro), detalhadas no Quadro 3.2 . |
| | | Tese de apoio 01: Estruturação do modelo conceitual de <i>roadmap</i> a partir do processo de pensamento da Teoria das restrições (TOC) aprimorado por Cox III e Schleier Jr.(2013). |
| | | Tese de apoio 02: Desenvolvimento de <i>Roadmaps</i> orientados por quatro dimensões de tecnologias <i>Front-end</i> propostas por Frank et. al. (2019): <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Smart Manufacturing (SM)</i>; ▪ <i>Smart Supply Chain (SSC)</i>; ▪ <i>Smart Product & Service System SPSS</i>); ▪ <i>Smart Working (SW)</i>. |

| ARTIGO 01 | ARTIGO 02 |
|--|---|
| Objetivo Geral | Objetivo Geral |
| <p>Propor um <i>roadmap</i> de I4.0 com FOCO EM PRÉ-REQUISITOS para a implantação, considerando:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ O processo de pensamento da TOC como ferramenta para a estruturação do <i>roadmap</i>; ▪ O atendimento das lacunas sinalizadas por Mittal; ▪ O direcionamento para uma das quatro dimensões <i>Smart</i>; ▪ Que o <i>roadmap</i> desenvolvido deve fornecer um passo a passo sob medida, para que as PMEs possam conduzir sua jornada de transformação digital, rumo ao primeiro nível de maturidade da I4.0. | <p>Propor um <i>roadmap</i> com FOCO EM GESTÃO de implantação de I4.0, considerando:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ O processo de pensamento da TOC como ferramenta para a estruturação do <i>roadmap</i>; ▪ O atendimento das lacunas sinalizadas por Mittal; ▪ O atendimento das lacunas identificadas nos modelos analisados no Quadro 3.2; ▪ O desdobramento do <i>roadmap</i> em quatro <i>frameworks</i>, um para uma das quatro dimensões <i>Smart</i>; ▪ Que o <i>roadmap</i> desenvolvido deve fornecer um passo a passo sob medida, para que empresas de qualquer porte possam conduzir sua jornada de transformação digital, rumo a evolução em todos os níveis de maturidade da I4.0. |
| Diagrama do Modelo Conceitual Proposto | Diagrama do Modelo Conceitual Proposto |
|  |  |

Dessa maneira, a estrutura e fundamentação propostas irão contribuir para que sejam reunidos os elementos para a construção da hipótese acerca do objeto de estudo.

1.2 Justificativas

As pesquisas de implantação das tecnologias aplicadas a I4.0 até o momento, focam as empresas de grande porte em países desenvolvidos (MITTAL, 2018), o que acentua ainda mais os desafios para a implantação no contexto das PMEs. Outro aspecto relevante observado de modo recorrente, é que nem todas as organizações desenvolvem de fato uma visão sistêmica e holística de seus processos (KRALJ, 2009), assim como não compreendem, de que forma os sistemas produtivos voltados para a I4.0, podem contribuir para maximizar seu desempenho (CNI, 2022).

Há uma série de estudos que propõem *roadmaps* de implantação de I4.0, modelos de maturidade e prontidão apresentados no Artigo 01 - Anexo A, assim como apresentados e discutidos no Artigo 02 na Seção 3.2.2, sendo o modelo de maturidade Acatech o mais

conhecido. No entanto, quanto a abordagem, estes modelos ou são demasiadamente generalistas ou específicos, abrindo lacunas relevantes identificadas por Mittal et. al. (2018). A necessidade de atribuir um nível zero aos modelos de maturidade, assim como de um sistema para autoavaliação em um roteiro de implantação sob medida, são as três lacunas identificadas pelo autor, que se buscou atender nos dois artigos apresentados nesta dissertação. Para tanto, os *roadmaps* desenvolvidos foram estruturados utilizando o processo de pensamento da Teoria das Restrições, assim como nas dimensões *Smart* propostas pelo estudo de Frank et. al. (2019).

Neste sentido, o desenvolvimento do tema é relevante, pois em um contexto no qual o processo de mudança é contínuo e exponencial (Duarte, 2017) é essencial reunir o máximo possível de dados, informações e conhecimento aplicado em torno do assunto para contribuir, para a tomada de decisão, de modo a fomentar o crescimento da atividade industrial. Assim como, mitigar os problemas oriundos da necessidade de uma mudança desta natureza, muitas vezes complicada no ambiente corporativo, ainda mais, quando poderão impactar fortemente na cultura organizacional reformulando, inclusive o próprio negócio (GHOBAKHLOO, 2021).

1.3 Delineamento do estudo

O delineamento do método de pesquisa e de trabalho são fundamentais para a pesquisa científica, pois trarão clareza, quanto a como o pesquisador atuou para alcançar seus objetivos. Neste sentido, é possível detalhá-los, conforme ao seguinte ítem, acerca da caracterização do método de pesquisa.

1.3.1 Caracterização do método de pesquisa

Quanto a sua natureza, a presente pesquisa apresenta-se como pesquisa aplicada. Desse modo, a pesquisa aplicada tem como objetivo produzir novos conhecimentos com aplicabilidade prática orientada para a solução de problemas específicos (SILVA E MENEZES, 2001). No que tange a forma de abordar a problemática, adotou-se uma abordagem qualitativa que permite uma maior autonomia ao pesquisador (Gil, 2002), além de contribuir com clareza e compreensão aprofundadas, acerca de determinado problema (MALHOTRA, 2010).

O alinhamento, quanto aos objetivos da pesquisa a caracterizam com uma abordagem exploratória. A pesquisa exploratória é mais versátil e flexível em sua estruturação (Fávero et. al., 2008; Malhotra, 2010), proporcionando proximidade com o problema, tornando-o mais

claro e compreensível (GIL, 2002). Esta característica está alinhada com a utilização de um questionário de pesquisa com perguntas abertas, no qual os entrevistados constroem suas respostas livremente, abrindo, desta forma a possibilidade de se observar aspectos que seriam ignorados em um questionário com respostas previamente definidas e, em muitos casos, evoluindo nas contribuições, para além do questionado.

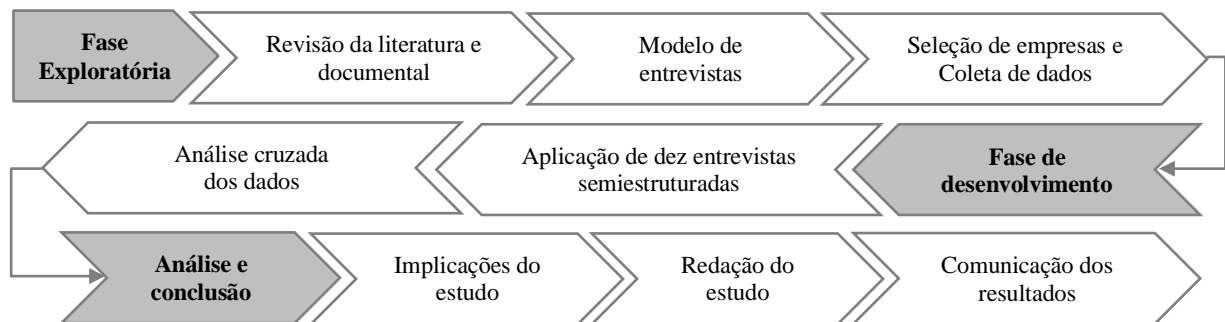
Para que se atenda aos objetivos, foram utilizados os seguintes instrumentos:

1. Pesquisa bibliográfica: a seleção dos materiais para fornecer a base teórica aos artigos, foi realizada em literaturas técnicas oriundas essencialmente de periódicos, pois se trata de um assunto contemporâneo, ainda com poucas publicações em outros formatos;

2. Pesquisa documental: foram analisados relatórios com indicadores de desempenho, portfólio de produtos e sistemas de governança corporativa das empresas participantes;

3. Entrevistas semiestruturadas: em que os questionamentos levantados procuraram identificar basicamente o que as empresas observariam melhor (os pré-requisitos) se tivessem que implementar tecnologias digitais novamente e, como organizariam (modelo de gestão) o processo de implantação. A Figura 1.1 apresenta o planejamento metodológico de pesquisa implementado. Os relatos foram evidenciados com a pesquisa documental, principalmente durante a análise de indicadores de desempenho.

Figura 1.1 - Desenho do planejamento da pesquisa.



Fonte: Adaptado de Yin (2001)

Neste contexto, a entrevista semiestruturada, se utiliza de questionamentos básicos, que são suportados por teorias e hipóteses, nas quais se relacionam ao tema pesquisado, (TRIVIÑOS, 1987). As respostas obtidas nos questionamentos permitem que sejam elaborados novos questionamentos, visando esgotar completamente o assunto. O pesquisador-entrevistador é quem dá o foco principal da entrevista.

1.3.2 Método de Trabalho

A pesquisa foi estruturada para ocorrer em três etapas: a pesquisa do referencial teórico em torno do assunto, visando trazer os elementos que corroborem com a pesquisa de campo, a pesquisa semiestruturada, que produziu os dados a serem analisados e a análise dos dados inferidos, acerca dos resultados obtidos em ambas as pesquisas. Participaram da pesquisa: especialistas, técnicos, gestores e proprietários de indústrias de pequeno porte, que segundo a Lei Complementar nº 139/2011 possuem faturamento anual entre R\$ 360.000,00 – R\$ 4.800.000,00; indústrias de médio porte, nas quais a Medida Provisória nº 2.190-34/2001 define que o faturamento anual, sendo superior a R\$ 4.800.000,00 e inferior a R\$ 20.000.000,00 e empresas de grande porte com faturamento anual superior a R\$ 20.000.000,00. A amostragem foi composta por dez entrevistas, sendo duas com CEO's, quatro com gestores de nível tático, três com especialistas que relataram experiências na implementação de projetos em empresas, e um especialista pesquisador com publicações na área.

1.4 Delimitações do estudo

Está pesquisa concentra-se nos pré-requisitos e planejamento para a gestão de projetos orientados para a implantação de tecnologias aplicadas a Indústria 4.0. A abordagem metodológica utilizada permite explorar uma série de aspectos não previstos inicialmente, mas que limitam a extrapolação dos resultados, apenas as empresas investigadas.

O estudo não pretende contemplar a análise de que tecnologias específicas (*hardwares* ou *softwares*) devem ser adotadas, como estas tecnologias funcionam ou qualquer outra análise desta natureza. A proposta deste estudo consiste em produzir conhecimento que contribua de forma sistêmica e holística para:

- Desmistificar a I4.0, principalmente entre as PMEs;
- Fomentar a implantação de soluções tecnológicas da I4.0 realizando uma análise consistente do contexto da empresa;
- Demonstrar que é possível implementar projetos efetivos, respeitando as singularidades de cada organização.

1.5 Estrutura da dissertação

A presente dissertação foi estruturada em três capítulos. O primeiro capítulo foi

estruturado visando contextualizar o leitor quanto ao tema, objetivo, justificativa, metodologia e contexto do projeto de pesquisa.

No capítulo 02 é apresentado o artigo 01, que traz consigo os resultados da pesquisa, reflexões e uma proposta de *roadmap*, acerca de que aspectos as PME's podem considerar antes mesmo de iniciar sua jornada rumo as tecnologias digitais, visando eliminar, ou pelo menos, mitigar as barreiras na implantação. E tendo em vista os problemas de gestão, que contornam o assunto, no capítulo 03 é apresentado o artigo 02, que além de trazer os dados da pesquisa e discuti-los, traz um *roadmap* com quatro *frameworks* orientando o passo a passo do processo de gestão de implantação de soluções tecnológicas guiadas para a I4.0.

E para consolidar e consubstanciar a pesquisa, no capítulo 04 são apresentadas as considerações finais da pesquisa. Como ainda há muito a ser pesquisado em torno do tema, em especial no contexto das PME's, o capítulo 05 apresenta sugestões de pesquisas futuras que possam contribuir complementando as pesquisas já realizadas ou preenchendo lacunas ainda existentes.

1.6 Referências

CNI. Conselho Nacional da Indústria, (2020). “Pesquisa: A Indústria 4.0 e a pandemia”.

CNI. Conselho Nacional da Indústria, (2022). “Pesquisa: A Indústria 4.0 cinco anos depois”.

Duarte, A. Y. S. (2017) . Tese de Doutorado: “Proposta de integração entre ferramentas de avaliação de ciclo de vida do produto e Indústria 4.0 (Industrie 4.0): estudo de caso da indústria têxtil e de confecção brasileira”. *Universidade de Brasília, UnB*.

Fávero, L. P., Belfiore, P., Silva, F. L., & Chan, B. (2009). “Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisão”. São Paulo: Campus.

Frank, A. G., Delanogare, L. S. & Ayala, N. F. (2019). “Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies”, *International Journal of Production Economics*, 210: 15-26.

Ghobakhloo, M., & Iranmanesh, M. (2021). “Digital transformation success under Industry 4.0: a strategic guideline for manufacturing SMEs”, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32(8): 1533-1556.

Gil, A.C. (2002). “Como elaborar projetos de pesquisa”. 4ª edição. São Paulo: Atlas.

Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2015). “Design Principles for Industries 4.0 Scenarios: A Literature Review”. *Technische Universität Dortmund*.

Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). "Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Securing the future of German manufacturing industry". *Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. Acatech, Forschungsunion.*

Kralj, D. W. (2009). "Systems thinking and modern green trends. Transactions on Environment and Development", v. 5 p. 415-424.

Ludke, M., & Marli, A. (1986). "Pesquisa em educação: Abordagens Qualitativas". SP: EPU.

Malhotra, N. K. (2010). "Marketing research: an applied orientation", 6th ed. Prentice Hall, New Jersey.

Mittal, S., Khan, M.A., Romero, D., & Wuest, T. (2018). "A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs)". *Journal of Manufacturing Systems*. 49, 194-214.

Silva, E.L., & Menezes, E.M., (2001). "Metodologia de pesquisa e elaboração de dissertação". *Laboratório de Ensino a Distância da UFSC*, Florianópolis.

Triviños, A. N. S. (1987). "Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação". São Paulo: Atlas.

YIN, R. K. (2001). "Estudo de caso: planejamento e métodos". 2ª Ed. Porto Alegre. Editora: Bookmam.

2. ARTIGO 1 – PRÉ-REQUISITOS PARA A IMPLANTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 EM PEQUENAS E MÉDIAS EMPRESAS: UM ROTEIRO EM QUATRO DIMENSÕES

Leandro Kappes

Néstor Fabián Ayala

Artigo publicado nos anais da Conferência AIMOT (*International Association for Management of Technology*)

Resumo

A indústria contemporânea vive em um contexto onde as ciências, em especial, as tecnológicas, desenvolvem-se de forma exponencial. A Indústria 4.0 assumiu um papel que pode ir além do processo de industrialização, o que torna a quarta revolução industrial mais complexa que as anteriores, principalmente, para as pequenas e médias empresas (PMEs). A proposta deste artigo é apresentar um modelo de *roadmap* de implementação de Indústria 4.0, que divide esta complexidade em sete questões norteadoras e quatro dimensões de aplicações tecnológicas. Para tanto, foram analisados nove estudos de casos em empresas de segmentos distintos, cobrindo todo o processo de adoção de soluções tecnológicas. Os resultados do estudo apontam para a necessidade de aquisição de conhecimento, orientação e suporte para consolidar a Indústria 4.0 no contexto das PMEs. Também foi observado que as PMEs possuem habilidades singulares, o que reforça a proposta de um *roadmap* mais flexível e passível de acomodar os ajustes necessários em cada contexto.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Pequenas e Médias Empresas; Fatores de Decisão, Modelos de Maturidade, Roteiro de Implementação.

Abstract

Contemporary industry lives in a context where science, in particular, technological ones, develop exponentially. Industry 4.0 has assumed a role that can go beyond the industrialization process, which makes the fourth industrial revolution more complex than the previous ones, especially for small and medium-sized enterprises (SMEs). The purpose of this article is to present a *roadmap*, which divides this complexity into seven guiding questions and four dimensions of technological applications. To this end, nine case studies were analyzed in companies from different segments, covering the entire process of adopting technological solutions. The results of the study point to the need to acquire knowledge, guidance and support to consolidate Industry 4.0 in the context of SMEs. It was also observed that SMEs have unique skills, which reinforces the proposal for a *roadmap* that can accommodate the necessary adjustments in each context.

Keywords: Industry 4.0; Small and Medium Enterprises; Decision Factors, Maturity Models, Implementation Roadmap.

2.1 Introdução

Nos últimos dez anos a indústria vem, invariavelmente, passando por grandes transformações, denominadas inicialmente na Alemanha de Indústria 4.0 (I4.0) - também conhecida como quarta revolução industrial. Este processo de mudanças foi analisado, por intermédio de uma pesquisa com 92 empresas por Frank, Delanogare e Ayala (2019a), que classificou as tecnologias aplicadas em tecnologias *front-end* e tecnologias de base. Da pesquisa emergem quatro dimensões de tecnologias *front-end*: *Smart Manufacturing*, *Smart Product & Service System*, *Smart Supply Chain* e *Smart Working* e outras quatro de tecnologias de base.

Nessa perspectiva, ainda são poucas as pesquisas analisando a I4.0 no contexto das PMEs, e a dificuldade para a obtenção de dados segue esta mesma tendência (Mittal et al., 2018). Este fato é evidenciado em revisões sistemáticas da literatura, nas quais se apresentam os conceitos em torno do tema, e quase que essencialmente, os impactos da I4.0 no processo específico de empresas manufatureiras, em vez de considerar transversalmente todos os processos de forma holística (Zheng et al., 2020; Oztemel et al., 2020). Contudo, há estudos relevantes, que comparam as estratégias de inovação exploratória, em que foi observado que as PMEs têm uma capacidade potencial de absorção de inovações mais elevada do que as grandes empresas (Müller, Buliga e Voigt 2018). Esta capacidade de inovação foi analisada utilizando os modelos de maturidade propostos no contexto das PMEs, na qual se inferiu que, nestes contextos é necessário atribuir um nível inferior (0) ao nível básico (1) propostos nestes modelos. Isto se deve à necessidade de ajustar o real nível de digitalização e maturidade de fabricação destas empresas, o esforço significativo para promover a mudança e a necessidade de se desenvolver modelos próprios de prontidão que sejam capazes de fornecer subsídios para desenvolver seus próprios roteiros de implantação (Mittal et al., 2018). Definida a capacidade de inovação das PMEs, torna-se relevante conceber quais fatores são mais críticos no processo de implantação da I4.0 nas PMEs, dentre os quais foram destacados: o conhecimento e treinamento dos envolvidos; apoio de especialistas consultores ou pesquisadores acadêmicos e o papel do gestor de PME, posto que se considera fundamental nos processos decisórios (Moeuf et al., 2019). O mesmo estudo destaca ainda, que o contexto específico das PMEs não parece ser um desafio para um projeto de I4.0, pois se as PMEs sofrem com a falta de experiência e recursos financeiros, também se beneficiam de sua agilidade organizacional e sua capacidade de mobilizar funcionários em toda a empresa.

As pesquisas de implantação das tecnologias aplicadas à I4.0 existentes até o momento

focam preferencialmente, em empresas de grande porte em países desenvolvidos (Mittal et al., 2018). Desse modo, se de um lado há poucas pesquisas orientadas para as PMEs, de outro já existem estudos relevantes sobre I4.0, como o que classificou as soluções tecnológicas em quatro áreas de aplicação da I4.0 (Frank, Delanogare e Ayala 2019a). Destarte, os desdobramentos deste estudo, visam desenvolver *roadmaps* alinhados com as idiossincrasias e necessidades das PMEs, como lacuna de pesquisa, que ainda não foi desenvolvida. Neste contexto, visando preencher esta lacuna, este estudo pretende responder: Qual seria o *roadmap* de implementação de I4.0 para PMEs considerando as quatro dimensões de tecnologias *front-end*?

Para responder a esta pergunta, esta pesquisa utiliza o processo de pensamento da Teoria das Restrições (TOC - *Theory of Constraints*) como lente teórica, pois deste modo é possível organizar as etapas do processo de adoção de soluções tecnológicas de forma estruturada. Neste sentido, ao responder a perguntas básicas, que são parte dos fundamentos da TOC (Cox III e Schleier Jr. 2013), a PME estará observando etapas importantes do processo de implantação de melhorias, o que tonará a adoção de soluções tecnológicas mais efetiva e alinhada com as necessidades da empresa.

Para que se alcance este objetivo será necessário ainda: caracterizar o que é I4.0, e as quatro dimensões de tecnologias *front-end*; identificar as práticas existentes aplicadas a implementação de tecnologias da I4.0 nas PMEs em cada dimensão. Em seguida, propor um *roadmap* de implementação alinhado, para cada uma das quatro dimensões com as singularidades das PMEs.

2.2 Fundamentos teóricos

2.2.1 As quatro dimensões Smart da I4.0

Em 2011, com o objetivo de fomentar o aumento de produtividade e eficiência da indústria nacional, o governo federal da Alemanha cria em parceria com universidades e iniciativa privada um programa estratégico para o desenvolvimento de sistemas avançados de produção (Hofmann e Rüsçh 2017). Este novo modelo industrial, chamado de Indústria 4.0 (I4.0), tem como diretrizes básicas conectar produtos, máquinas e pessoas ao meio ambiente e combinar produção, tecnologia da informação e internet (Kagermann, Wahlster e Helbig 2013). Nesse contexto, há um número crescente de estudos que vem sendo desenvolvidos nesta

área (Culot et al., 2020). Dentre estes estudos, analisando as tecnologias e suas áreas de aplicação, Frank, Delanogare e Ayala (2019a) sugerem que estas tecnologias sejam classificadas em duas camadas: tecnologias de base e tecnologias *front-end*. As dimensões *Smart Manufacturing*, *Smart Product & Service System*, *Smart Supply Chain* e *Smart Working* são apresentadas como tecnologias *front-end* e *Cloud Computing*, *Internet of Things (IoT)*, *Big Data* e *Data Analytics*, como tecnologias de base comuns as quatro dimensões de tecnologias *front-end* (Figura 2.1). As tecnologias de base definem o estágio de maturidade industrial para implementação da I4.0 e são amplamente mencionadas em publicações na área (Dalenogare et. al., 2018; Frank et al., 2019b). A integração entre as tecnologias de base, que mudaram a conectividade dos sistemas de manufatura, e as máquinas em *Cyber-Physical Systems (CPS)* caracterizam este novo estágio industrial (Kagermann, Wahlster e Helbig 2013; Schwab 2017).

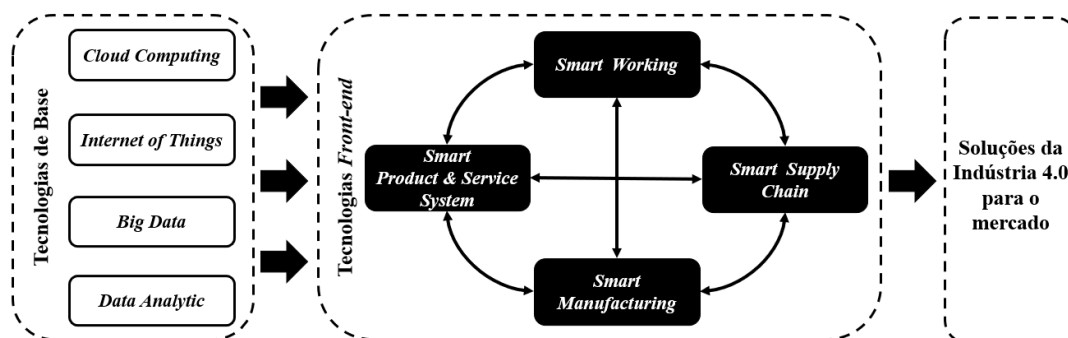


Figura 2.1 - Modelo conceitual de transformação digital e as quatro inteligências da I4.0. Adaptado de Frank, Delanogare e Ayala (2019a).

2.2.2 Investigando as dimensões Smart nas PMEs

Tendo em vista as particularidades que diferem uma PME de uma empresa de grande porte, torna-se relevante identificar os pré-requisitos específicos alinhados com as necessidades das PMEs que contribuem no processo de implantação de tecnologias da I4.0, que a saber são: financeiros, disponibilidade de recursos técnicos, produtos especializados, padrões de trabalho, cultura organizacional, participação dos funcionários, alianças e colaboração (Mittal et al., 2018). No Quadro 2.1 são apresentadas publicações que descrevem aplicações específicas das tecnologias da I4.0 com uma ou no máximo duas dimensões *Smart*, conforme modelo proposto por Frank, Delanogare e Ayala (2019a), analisando as PMEs ou mencionando-as no contexto geral do estudo.

Quadro 2.1 Pesquisas de I4.0 no contexto das PMEs e suas respectivas dimensões *Smart*.

| Dimensão | Temática | Autores |
|---|--|-----------------------------------|
| <i>Smart Manufacturing</i> | Apresenta <i>framework</i> estratégico de implementação I4.0 para PMEs | Ghobakhloo e Iranmanesh, (2021) |
| <i>Smart Manufacturing</i> | Analisa a relação causal entre grau de abertura à I4.0 e o ganho de desempenho | Büchi, Cugno e Castagnoli, (2020) |
| <i>Smart Manufacturing</i> | Estratégias de implementação da I4.0 para que PMEs se tornem 4.0 | Kumar, Singh e Dwivedi, (2020) |
| <i>Smart Manufacturing</i> | Analisa ecossistema com cocriação de valor em <i>cluster</i> industrial eletroeletrônico na região sul | Benitez, Ayala e Frank, (2020) |
| <i>Smart Manufacturing</i> | A aprendizagem organizacional no contexto da I4.0 | Tortorella et al. (2020) |
| <i>Smart Manufacturing</i> | Revisão sistemática da literatura analisando o impacto das tecnologias I4.0 na prestação de serviços do PCP | Bueno, Filho e Frank, (2020) |
| <i>Smart Manufacturing</i> | Define I4.0 e os seis princípios de design: interoperabilidade, virtualização, local, talento em tempo real, orientação a serviços e modularidade | Oztemel e Gursev, (2020) |
| <i>Smart Manufacturing</i> | Revisão de literatura: tecnologias de habilitadoras a I4.0 em processos de ciclo de vida de fabricação | Zheng et al. (2020) |
| <i>Smart Manufacturing</i> | O conhecimento e o treinamento como centro do sucesso de um projeto da I4.0, assim como de especialistas externos e do gestor da PME | Mouef et al. (2019) |
| <i>Smart Manufacturing</i> | Apresenta <i>framework</i> de implementação de I4.0 para PMEs | Mittal et al. (2019) |
| <i>Smart Manufacturing</i> | Impacto da inovação com a criação de valor, captura de valor e oferta de valor na indústria de manufatura | Müller, Buliga e Voigt, (2018) |
| <i>Smart Manufacturing</i> | Revisão de literatura: foco na análise das práticas de planejamento e controle da produção nas PMEs | Mouef et al. (2017) |
| <i>Smart Manufacturing</i> | O que falta e como adaptar os modelos de maturidade conhecidos para atender aos requisitos específicos de implementação I4.0 em PMEs | Mittal et al. (2018) |
| <i>Smart Manufacturing</i> | Revisão da literatura com potenciais cenários para a indústria de manufatura até 2030 | Culot et al. (2020) |
| <i>Smart Supply Chain</i> | Identifica cinco <i>clusters</i> em condições distintas para implementação I4.0 influenciados pela: estrutura industrial, papel na economia do país e as diferenças nos modelos de negócios ou estilos de gestão | Branco et al. (2019) |
| <i>Smart Supply Chain</i> | Investiga a digitalização da cadeia de suprimentos no ponto de vista de fornecedores de PMEs, e contribuir como investigação de sistemas de governança (contratos legais e contratos relacionais) | Son et al. (2021) |
| <i>Smart Product & Service System</i> | Inferir que a cooperação é fator determinante em ecossistemas para o desenvolvimento de produtos inteligentes | Kahle et al. (2020) |
| <i>Smart Product & Service System</i> | Estabelece relação entre o nível de digitalização, servitização e estratégia de negócios | Müller et al. (2020) |

2.2.2.1 A *Smart Manufacturing*

A *Smart Manufacturing* é a aplicação que mais concentra pesquisas da I4.0 em PMEs. Neste sentido, é importante definir o nível de maturidade da empresa de manufatura, bem como

um roteiro de implementação para as tecnologias aplicadas a *Smart Manufacturing* orientado para PMEs. Dessa maneira, estudo utilizando três modelos de maturidade para a implantação da *Smart Manufacturing* em PMEs, o *DREAMY (Digital Readiness Assessment Maturity)*, *SMSRL (Intelligent Manufacturing Readiness Level)*, bem como o *MOM (Manufacturing Operations Management Capability Maturity Model)*, observou que os referidos modelos não atendem a necessidade das PMEs, pois não consideram os requisitos identificados na pesquisa conduzida por Mittal et al. (2018). O estudo sugere ainda, o desenvolvimento de um modelo de maturidade que reflita essa diversidade, e que possa ser integrado a uma ferramenta de autoavaliação, onde o gerente da PME consiga conduzir a jornada em direção a *Smart Manufacturing*, modelo este proposto *a posteriori* por Mittal et. al. (2019). Observar aspectos como a flexibilidade, reatividade e proximidade com o cliente também são fatores críticos de sucesso para as PMEs, principalmente quando são analisadas as tecnologias aplicadas ao planejamento e controle de produção, em outras palavras, o processo de integração vertical, visando tornar mais ágil o fluxo de informações, e sendo assim, otimizando a tomada de decisão neste processo (Mouef et al., 2017).

Nessa conjuntura, a digitalização da empresa é um dos pré-requisitos fundamentais para a adoção da I4.0. Há dois elementos centrais básicos associados a forma como a digitalização afeta a inovação: a infraestrutura visando a I4.0, e a maturidade do *Big Data* (Frank, Delanogare e Ayala 2019a). Sendo assim, a capacidade de extrair dados da manufatura e da cadeia de suprimentos tem um grande valor agregado, pois aumenta a capacidade de predição de resultados (Branco et al., 2019). A capacidade de entender, implementar e desenvolver tecnologias sem o suporte de profissionais qualificados é outro fator que eleva os riscos do processo de implantação (Mittal et al., 2018). Para tanto, a criação de ecossistemas de cocriação de inovação pode impulsionar fornecedores ao desenvolvimento de plataformas das principais tecnologias, promovendo a inclusão de tecnologias complementares baseadas nos atributos definidos pelo cliente. Além da importância de consolidar a cocriação de valor entre fornecedores da I4.0 e clientes, a longo prazo este processo pode convergir para os ecossistemas baseados, também na prestação de serviços (Benitez, Ayala e Frank 2020).

2.2.2.2 A *Smart Supply Chain*

No desenvolvimento da *Smart Supply Chain*, o conceito de Logística 4.0 é uma progressão futurista que recomenda a incorporação de roteamento otimizado, requisitos de

armazenamento reduzidos, robôs autônomos com sistemas de rastreamento e decisão para controle otimizado de estoque e troca de informações (Winkelhaus e Grosse 2020). Um exemplo de aplicação deste estudo é realizado para fornecer sistemas de armazenamento autônomos completos, com soluções com robô-máquinas e esteiras auto transportadoras, com o algoritmo *flow shop* (Centobelli et al., 2015). Há poucos estudos empíricos que retratam as aplicações das tecnologias da *Smart Supply Chain* em PMEs, a maioria das publicações tratam de aplicações específicas na cadeia de suprimentos e não desenvolvem uma visão holística sobre o tema. Desse modo, dentre os poucos estudos empíricos que retratam as aplicações das tecnologias da *Smart Supply Chain* em PMEs Son et al. (2021), após analisar os resultados de pesquisa com 125 empresas coreanas destaca a importância das PMEs considerarem o fato de que, as tecnologias digitais da cadeia de suprimentos tem potencial para promover visibilidade e rastreabilidade em tempo real para as empresas. Contudo o estudo alerta para a possibilidade da prática do oportunismo de compradores membros da cadeia de suprimentos, a partir do momento que se tem acesso aos dados do fornecedor. No entanto, para evitar este comportamento, o estudo sugere a adoção de um contrato legal formal que, de maneira coercitiva irá desencorajar este comportamento gerando custos que podem ser aplicados, por meios legais ao faltoso. A eficácia da governança contratual depende em grande medida, dos detalhes e da precisão das especificações do contrato.

2.2.2.3 O *Smart Product & Service System*

O desenvolvimento de *Smart Product & Service System* requer conhecimentos e habilidades que usualmente as PMEs não dispõe integralmente (Abramovici, Göbel e Dang 2016), pois as soluções inteligentes são complexas e sistêmicas. Sendo assim, passa a ser interessante que estas empresas estabeleçam um ecossistema de cooperação para seu desenvolvimento (Porter e Heppmann 2015). Dentre os fatores que contribuem para o desenvolvimento de *Smart Product & Service System*, em um ecossistema de inovação, a capacidade de integração de sistemas é o fator de sucesso mais relevante, pois permite o desenvolvimento de um produto inovador, com a integração das capacidades de cada sistema (Kahle et al., 2020). Esta oportunidade de mudança de estratégia de empresa centrada em produtos para sistemas de produtos e serviços (SPS) (Kowalkowski, Gebauer e Oliva 2017; Martinez et al., 2017), ampliam a competitividade para as empresas que adotam esta forma de inovação do modelo de negócios (Ayala, Gerstlberger e Frank 2019). Para que as PMEs obtenham êxito no desenvolvimento de soluções inteligentes é importante que se apropriem de

conhecimento sobre inteligência artificial, modularidade de sistemas, servitização e gestão de fontes de financiamento apropriadas para criar um ambiente de inovação focada em *Smart Product & Service System* (Kahle et al., 2020).

2.2.2.4 O Smart Working

Ainda não foram publicados estudos, que analisem a aplicação da dimensão *Smart Working* nas PMEs. Os estudos neste sentido concentram-se em analisar tecnologias com aplicações bem específicas. Um exemplo de pesquisa neste sentido em PMEs foi desenvolvido por Ong et al. (2020). Os pesquisadores, ao identificarem que, um dos motivos pela baixa utilização de robôs em PMEs se deve a dificuldade em dispor de profissionais qualificados para programá-los, propõem a utilização de tecnologias de realidade aumentada para mitigar o problema. Em outro exemplo, visando reduzir a complexidade e a incerteza inerentes as ilhas de montagem com posição fixa, Guo et al. (2020) apresenta um Sistema de Manufatura Inteligente de Graduação (DT-GiMS) habilitado para gêmeos digitais, onde representações digitais unificadas com conjuntos apropriados de informações são criadas em nível de objeto, nível de produto e nível de sistema. Visando essa condição, a convergência e a sincronização em tempo real entre eles asseguram que os recursos certos sejam alocados e utilizados para as atividades certas no momento certo com visibilidade aprimorada.

No terceiro exemplo, aplicando realidade aumentada e um assistente digital pessoal inteligente com recursos de interação de voz, Longo, Nicoletti e Padovano (2017) propõem uma solução denominada Sophos-MS. A tecnologia proposta é capaz de integrar conteúdos de realidade aumentada, e sistemas tutores inteligentes com tecnologias de fruição de ponta para suportar operadores em ambientes onde a complexidade homem-máquina se faz presente. Mesmo se tratando de uma dimensão *Smart* com menos pesquisas, até o presente momento, esta dimensão tem grande potencial para inserir as PMEs na I4.0, pois demanda de ações pontuais nos processos da empresa, o que facilita a implantação. Estas empresas podem proporcionar melhores condições aos trabalhadores, a fim de aumentar a sua produtividade (Kagermann, Wahlster e Helbig 2013).

Nesse contexto, é importante que se observe, que a inovação impulsionada pela tecnologia está no centro da I4.0, e pode conduzir a uma inovação radical no modelo de negócio das empresas (Müller, Buliga e Voigt 2018; Wei, Song e Wang 2017). A inovação com a *criação de valor* como fator de fomento para o aumento da produtividade, flexibilidade, mix de produtos e menor dependência de mão de obra em atividades repetitivas é o principal fator

observado por PMEs na implantação da I4.0. Contudo as empresas também reconhecem a possibilidade da *oferta de valor* em soluções aprimoradas de serviços, manutenção e desenvolvimento de produto, assim como na *captura de valor*, por meio da facilidade de comunicação entre clientes e fornecedores (Müller, Buliga e Voigt 2018).

2.2.3 Análise de modelos de implantação de I4.0 para PMEs

Há vários modelos de maturidade, *frameworks* e avaliações de prontidão disponíveis na literatura. Entretanto, em revisão da literatura realizada por Mittal et al. (2018), analisando quinze modelos de maturidade, de prontidão, *roadmaps* e *frameworks* orientado por sete grupos de requisitos para o atendimento de PMEs, os autores constataram que a maioria destes modelos consideram quase que, essencialmente, as necessidades de Empresas Multinacionais (EMNs) para a implantação da I4.0. Neste sentido, este trabalho tomará a pesquisa supracitada como referência, propondo alternativas para as lacunas identificadas pelos autores. Um resumo dos modelos analisados por Mittal et. al. (2018) está disponível no Anexo A deste trabalho.

O estudo destaca três lacunas relevantes nos modelos analisados. A primeira lacuna menciona a diferença de condições entre as PMEs e as EMNs, quando iniciam o projeto de implantação de I4.0. Neste contexto recomenda a inclusão de um “nível 0” nos modelos existentes, pois entende que, mesmo sabendo que algumas PMEs são referência na aplicação de soluções tecnológicas em seus segmentos, isto não pode ser generalizado uma vez que, a maioria não dispõe das condições mínimas para iniciar a jornada rumo a I4.0. A inclusão deste nível facilitaria a compreensão do contexto, no qual as PMEs estão inseridas, isto é, o estado atual, assim como da jornada a seguir e, posteriormente rumo aos demais níveis de maturidade. A segunda lacuna sugere que a maioria dos modelos analisados carecem de uma ferramenta de autoavaliação, e sendo assim, dificultam a autoavaliação das PMEs em seu ponto de partida. Na terceira e última lacuna, Mittal et al. (2018) aponta para a necessidade de desenvolver suporte sob medida, para as PMEs visando atender a próxima etapa, após a maturidade e a prontidão serem avaliadas, permitindo desta forma, que as PMEs desenvolvam seus próprios roteiros de implantação.

2.2.4 O processo de pensamento da TOC como lente teórica para guiar um roadmap de I4.0

A Teoria das Restrições (TOC) desenvolvida por Goldratt (1990) tem entre seus fundamentos três questionamentos iniciais para estruturar o processo de pensamento, que posteriormente foi ampliado para cinco, por Cox III e Schleier Jr. (2013). Estes questionamentos visam propor uma forma estruturada de pensar de modo que objetivos, restrições, planejamento, ações e avaliações sejam considerados, durante a análise de qualquer evento. O processo de pensamento da Teoria das Restrições permite desenvolver uma análise de eventos de forma sistêmica e holística, proporcionando uma visão abrangente do sistema em análise, identificando oportunidades e problemas mais relevantes. O que por sua vez, permite que o analista se concentre na implementação das ações (causas), que irão produzir o resultado desejado (efeito).

Dado os modelos existentes apresentados anteriormente, é possível observar que a TOC permitiria organizar claramente o passo a passo de uma jornada da I4.0 para as PMEs, uma vez que considera as principais perspectivas aplicadas na implantação de novos projetos. Estes cinco passos podem orientar o projeto de implantação considerando todos os grupos de requisitos mencionados por Mittal et al. (2018), para atender as singularidades das PMEs, tanto no cenário interno como externo. Além disso contribuirão, para que as PMEs definam claramente seus objetivos, assim como viabilizará a criação de uma métrica de autoavaliação, lacuna identificada pelos mesmos autores. Assim, a Figura 2.2 apresenta a *framework* conceitual, que será utilizado para análise dos estudos de caso.

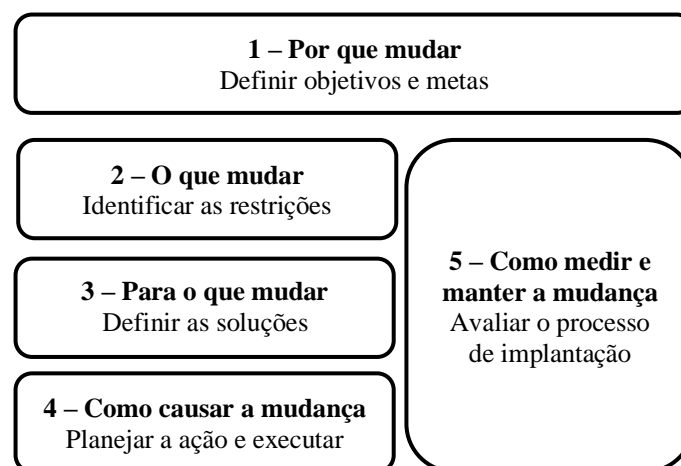


Figura 2.2 - Modelo conceitual aplicado ao estudo. Adaptado de Cox III e Schleier Jr. (2013).

2.3 Método de pesquisa

Esta pesquisa foi conduzida utilizando uma abordagem empírica, com base na coleta e análise de dados qualitativos, mediante a aplicação de múltiplas entrevistas. A aplicação da pesquisa qualitativa com entrevistas é utilizada quando se deseja compreender a complexidade do objeto de pesquisa e ser capaz de situá-lo no contexto de suas práticas socioculturais que, por sua vez, configuram determinadas atividades (MIGUEL, 2010), mesmo considerando o fato de que na pesquisa qualitativa há um vínculo indissociável, entre o mundo objetivo e a subjetividade do sujeito (Prodanov e Freitas 2009). Neste sentido, o estudo com múltiplas entrevistas reduz o viés do observador potencial e aumenta a validade externa (Voss, Tsirikikysis e Frohlich 2002), onde os dados são tratados, de modo a se obter conclusões analíticas convincentes e eliminar interpretações alternativas (YIN 2009). Desse modo, foi utilizada a estrutura conceitual (Figura 2.2), para fundamentar a pesquisa e orientar o estudo empírico. O desenho da pesquisa foi baseado em Voss, Tsirikikysis e Frohlich (2002), com orientações descritas a seguir e suas etapas apresentadas na Figura 2.3.

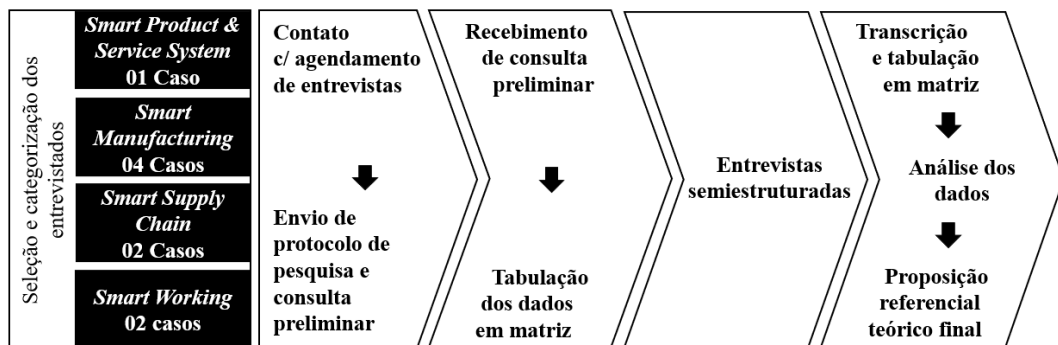


Figura 2.3 – Framework com a metodologia de pesquisa aplicada

2.3.1 Seleção dos casos

A seleção dos casos aconteceu, por meio de uma amostragem teórica, na qual, segundo Eisenhardt e Graebner (2007), a amostragem teórica contribui lançando luz, acerca dos construtos, para os casos selecionados. O primeiro passo foi identificar PMEs, que já tivessem consolidado ou estivessem iniciando a jornada de transformação digital rumo a I4.0. Um primeiro contato foi realizado por telefone, para conhecer a disponibilidade das empresas em participar da pesquisa. O segundo passo consistiu em examinar o perfil das empresas e agrupar as potenciais respondentes (Voss, Tsirikikysis e Frohlich 2002) nas quatro dimensões de aplicação de tecnologias propostas por Frank, Delanogare e Ayala (2019a). Concluído a etapa

anterior ficou evidente que as PMEs possuem maior adesão a dimensão de *Smart Manufacturing*, o que conduziu a uma nova seleção de casos convidando especialistas e fornecedores de soluções tecnológicas, para apresentarem seus casos já implementados de I4.0, visando complementar a amostragem nas quatro dimensões.

Dessa maneira, as empresas foram escolhidas em segmentos distintos, pois o projeto de pesquisa deve prestar atenção a quais empresas devem ser estudadas, os métodos para estudá-las e os dados a serem coletados, visando produzir resultados contrastantes que possam oferecer uma visão mais ampla do fenômeno e facilitar a generalização dos resultados (Ceschin 2013; Yin 2009; Voss, Tsirikyisis e Frohlich 2002). A amostragem ficou definida com cinco empresas, quatro relatos de especialistas e um fornecedor. A abertura da amostragem incluindo também especialistas e um fornecedor foi importante, pois, além de contribuir como respondentes, com visões distintas, fato que também contribui para a validação e a possibilidade de generalização dos resultados (Voss, Tsirikyisis e Frohlich 2002), possibilitou analisar as dimensões *Smart*, ainda pouco conhecidas por PMEs no contexto das PMEs.

2.3.2 Instrumentos de pesquisa

O estudo foi desenvolvido com a aplicação de entrevistas semiestruturadas. Durante o agendamento das entrevistas, os respondentes receberam por e-mail o protocolo de pesquisa e um formulário de consulta preliminar. O protocolo de pesquisa aprimora a confiabilidade e a validade dos dados de entrevistas coletadas (MILES & HUBERMAN, 1994). No formulário de consulta preliminar, os respondentes informaram: dados de suas empresas, tecnologias que utilizam, data de início e responsável pelo processo de transformação digital, assim como dados de identificação, educação formal, nível de participação nos processos de implementação da I4.0 e o cargo dos entrevistados em suas respectivas empresas.

2.3.3 Coleta de dados

Os dados da consulta preliminar obtidos antecipadamente por e-mail foram fundamentais, para a preparação das entrevistas semiestruturadas, pois ao utilizar empresas de segmentos distintos, especialistas e fornecedor, para ampliar o contraste e melhorar a confiabilidade da análise (Yin 2009), se ampliou também a diversidade e complexidade das respostas. Das dez

entrevistas realizadas, cinco ocorreram por indicações de fornecedor de soluções tecnológicas, fato que permitiu coletar dados sobre as empresas, junto a este fornecedor, antes mesmo das entrevistas, bem como foram consultados como fontes complementares de dados os sites, relatórios com indicadores de desempenho, portfólio de produtos e documentos que complementassem a análise dos sistemas de governança das empresas, o que ampliou a triangulação de dados (Yin 2009).

Nesse caso, procurou-se entrevistar preferencialmente as pessoas que foram responsáveis pelo processo decisório de adoção de soluções tecnológicas, e que participaram ou tinham amplo conhecimento de todas as etapas do processo de implementação. Uma vez que os entrevistados tinham domicílio em regiões e, até em estados distintos, todas as entrevistas foram realizadas por vídeo conferência, sendo gravadas com a autorização dos respondentes na devolutiva da consulta preliminar e posteriormente transcritas. As entrevistas tiveram uma duração média de 50 minutos e foram realizadas por um único entrevistador. Todas as etapas do processo de coleta de dados ocorreram entre os meses de março a junho de 2022.

Quadro 2.2 - Resumo dos dados da consulta preliminar

| Smart pesquisado | Segmento | Fonte de dados | Tecnologias disponíveis | Início digitalização |
|--------------------------------------|-------------------------|---|---|-----------------------------|
| Smart Manufacturing Empresa A | Metalúrgico | CEO – Engenheiro mecânico - 20 anos de empresa | (01) (02) (03) (04) (05) (08) (09) (11) (12) (13) (14) (16) | 2015 |
| Smart Manufacturing Empresa B | Plástico | Diretor Industrial - Engenheiro Mecânico – 21 anos de empresa | (01) (02) (03) (04) (05) (08) (11) (12) (13) | 2018 |
| Smart Manufacturing Empresa C | Tecnologia aeroespacial | Gerente – Engenheiro Produção - 16 anos de empresa | (01) (02) (03) (04) (05) (08) (11) (12) (13) | 2018 |
| Smart Manufacturing Empresa D | Construção Civil | CEO / Consultor – Engenheiro Civil - 25 anos de empresa | (02) (07) (09) (11) | 2018 |
| Smart Supply Chain Empresa E | Comércio | Doutoranda em Engenharia de Produção Consultora Especialista - 04 anos de empresa | (01) (02) (03) (04) (05) (11) (15) | 2021 |
| Smart Supply Chain Empresa F | Alimentício | Coordenador – Tecnólogo em Processos Gerenciais - 04 anos de empresa | (01) (02) (03) (04) (05) (08) (11) (15) (13) (14) (16) | 2016 |
| Smart Working | Educação | Pesquisador / escritor – Engenheiro Mecânico - 20 anos de exp. | (06) (07) | 2018 |
| Smart Working Empresa G | Produtos de borracha | Supervisor Engenharia de Segurança – Especialista em Ergonomia - 04 anos de empresa | (01) (02) (03) (04) (05) (11) (16) | 2015 |
| Smart Working Empresa H | Moveleiro | Doutoranda em Engenharia de Produção /Consultora Especialista | (16) (07) | 2021 |

| | | | | |
|---|----------------------|---|----------------------------------|------|
| | | - 2,5 anos de empresa | | |
| Smart Product & Service System Empresa I | Equipamentos médicos | Coordenador de Projetos - Engenheiro Eletricista - 11 anos de empresa | (01) (02) (03) (04) (08) (11) | 2018 |

Nota: (01) Computação em nuvem; (02) *Big data*; (03) *Analytics*; (04) IoT; (05) CLPs, sensores, atuadores e RFID; (06) Realidade aumentada; (07) Realidade virtual; (08) Manufatura aditiva; (09) Simulação e modelagem; (10) Gêmeos digitais (11) ERP; (12) SCADA; (13) MES; (14) APS; (15) WMS; (16) Robótica/Cobot/AGV/AMR (17) Computação visual

2.3.4 Validade e confiabilidade

No que tange à confiabilidade e validade do construto, foram utilizadas múltiplas fontes de evidências entrevistando profissionais com atuação em segmentos distintos, assim como especialistas, fornecedores de tecnologias e fontes secundárias de dados complementares (Voss, Tsirikyisis e Frohlich 2002). A utilização de fontes distintas de evidências assegura a confiabilidade dos resultados, uma vez que passam a ter mais qualidade (Martins 2006). A validação externa foi assegurada pela aplicação de múltiplas entrevistas. E, por fim a confiabilidade foi assegurada utilizando um protocolo de estudo de caso e um resumo final que foi elaborado com base na transcrição das entrevistas gravadas e observações. Alguns desses procedimentos foram descritos nas seções anteriores.

2.3.5 Análise dos dados

O primeiro passo para a análise dos dados foi transcrever os dados das gravações das entrevistas. O passo seguinte consistiu no cruzamento dos dados da matriz obtida com a tabulação dos formulários de consulta preliminar já consolidados anteriormente (Quadro 2.2), com os resultados das entrevistas, o que possibilitou estabelecer uma nova matriz (Voss, Tsirikyisis e Frohlich 2002) do contexto, em que cada empresa estava inserida (Quadro 2.3) analisando sob a ótica da Teoria das Restrições (Cox III e Schleier Jr. 2013), conforme modelo conceitual proposto na Figura 2.2.

Cada caso foi analisado individualmente e de forma cruzada, de modo a identificar e categorizar fatores em comum, contrastes e padrões com os demais casos (Voss, Tsirikyisis e Frohlich 2002). As redundâncias e discrepâncias observadas foram tabuladas para a obtenção de resultados consistentes e passíveis de análise. Por fim, foi realizado um cotejo dos resultados da análise de casos cruzados com a literatura e desenvolvido um referencial teórico final.

2.4 Resultados e discussões

O Quadro 2.3 apresenta os resultados da aplicação das entrevistas semiestruturadas. Os resultados foram organizados de modo a informar: quem e em que ano teve início o processo de transformação digital, a motivação para este direcionamento, se houve ou não um processo de avaliação preliminar do contexto da empresa, as primeiras tecnologias implantadas e o motivo da escolha, as principais dificuldades encontradas e as oportunidades de melhoria identificadas no processo de implantação.

Quadro 2.3 Resumo dos resultados encontrados na pesquisa 01

| Categoria / Dimensão | Iniciativa | Motivação | Avaliação Preliminar | Primeiras Tecnologias | Dificuldades na Implantação | Avaliação Pós-implantação |
|---|--|--|--|--|---|---|
| Empresa A - Smart Manufacturing | CEO 2015 | Dificuldade de padronização de processo. | Sem análise. | SCADA, MES e APS. | Sem infraestrutura, padronização e conhecimento. | Pesquisar fornecedores. |
| Empresa B - Smart Manufacturing | CEO 2018 | Otimizar desempenho do processo. | Necessidade de dados para tomada de decisão. | SCADA, MES e APS. | Implementou piloto, mas teve dificuldade para replicar no restante da empresa | Implementar piloto em processo com equipamentos distintos. |
| Empresa C - Smart Manufacturing | Diretoria 2018 | Otimizar desempenho do processo. | Não foi realizada nem mesmo no processo a ser aplicado. | SCADA MES | Sem infraestrutura, padronização e conhecimento. Implantação do APS não evoluiu. | Mapear processos buscando solução integrada entre as unidades. |
| Empresa D - Smart Manufacturing | Diretoria 2018 | Gestão de dados e projetos. | Não houve, demanda identificada em feiras e eventos impulsionada pela concorrência. | ERP, Realidade virtual e Modelagem de projetos. | Empresas agem por impulso muitas vezes sem foco e sem infraestrutura mínima. | Assumir a gestão do cronograma de implantação. |
| Empresa E - Smart Supply Chain | Diretor Operações 2018 | Em toda a empresa com escopo em melhoria contínua e gestão da informação. | Sim participaram do estudo 03 empresas: 01 <i>inbound</i> , 01 <i>outbound</i> e outra gestora do projeto. | Estudo de viabilidade: otimização de TICs e conectividade de ponta a ponta. | Algumas de infraestrutura. | Tornaria o projeto mais factível implementando etapas com ciclos controlados. |
| Empresa F - Smart Supply Chain | Gerente de Operações 2018 | Agilizar processos e reduzir custos na movimentação dos produtos. | Análise pontual do processo a ser implementado | AGV - <i>Automated Guided Vehicle</i> AMR - <i>Autonomous Mobile Robots</i> . | Área de projetos teve que contornar uma série de contratemplos. Pouco conhecimento explícito. | Entender processos e os requisitos, buscando definir um plano de contingências. |
| Empresa G - Smart Product & Service System | Equipe Técnica via Lei de Informática 2018 | Manutenção preditiva e preventiva. | Aplicação do usuário final. | Big Data Analytics e Geolocalização. | Projeto foi redefinido mais de uma vez. Conhecimento em torno do assunto precisa ser aprimorado. | Desenvolver produto e um novo processo de fabricação para o novo produto. |
| Empresa H – Smart Working | Comitê Gerencial 2015 | Otimização de desempenho do operador. | Produto foi apresentado a empresa para testes. | Exoesqueletos | Projeto piloto sem preparação prévia das equipes. Falta de conhecimento. | Realizar imersão no assunto antes de novas implantações. |
| Empresa I- Smart Working | Diretor Industrial 2021 | Inspeção e produção de peças, ambos visando otimizar o desempenho do operador. | Análise de problemas e oportunidades de melhoria orientados por <i>roadmap</i> . | Realidade aumentada e Cobot | Não identificou dificuldades significativas | Estruturar projeto com orientações prévias quanto as próximas etapas. |
| Especialista com publicações na área - Smart Working | Não aplicável ao respondente | Desenvolvimento de produtos, manutenção e capacitação de pessoas. | Profissionais abertos ao novo, pois as tecnologias podem ficar obsoletas em pouco tempo. | Realidade aumentada e Realidade virtual | Softwares com construção básica. Soluções devem ser desenvolvidas. Necessita de profissionais qualificados. | Não aplicável ao respondente. |

Ao estruturar os resultados do Quadro 2.3 ficou evidente a necessidade de incrementar duas novas perspectivas, que são contribuições deste estudo, ao modelo conceitual fundamentado na TOC proposto inicialmente (Figura 2.2). Estas duas novas perspectivas deixam o modelo mais robusto, pois contribuem para eliminar lacunas já mencionadas na literatura (Seção 2.2.3), assim como contribuem como elementos de preparação e controle ao processo de implementação da I4.0. A Figura 2.4 apresenta o modelo conceitual com as duas novas perspectivas destacadas em negrito, assim como o detalhamento das quatro dimensões *Smart* propostas por Frank, Delanogare e Ayala (2019a).

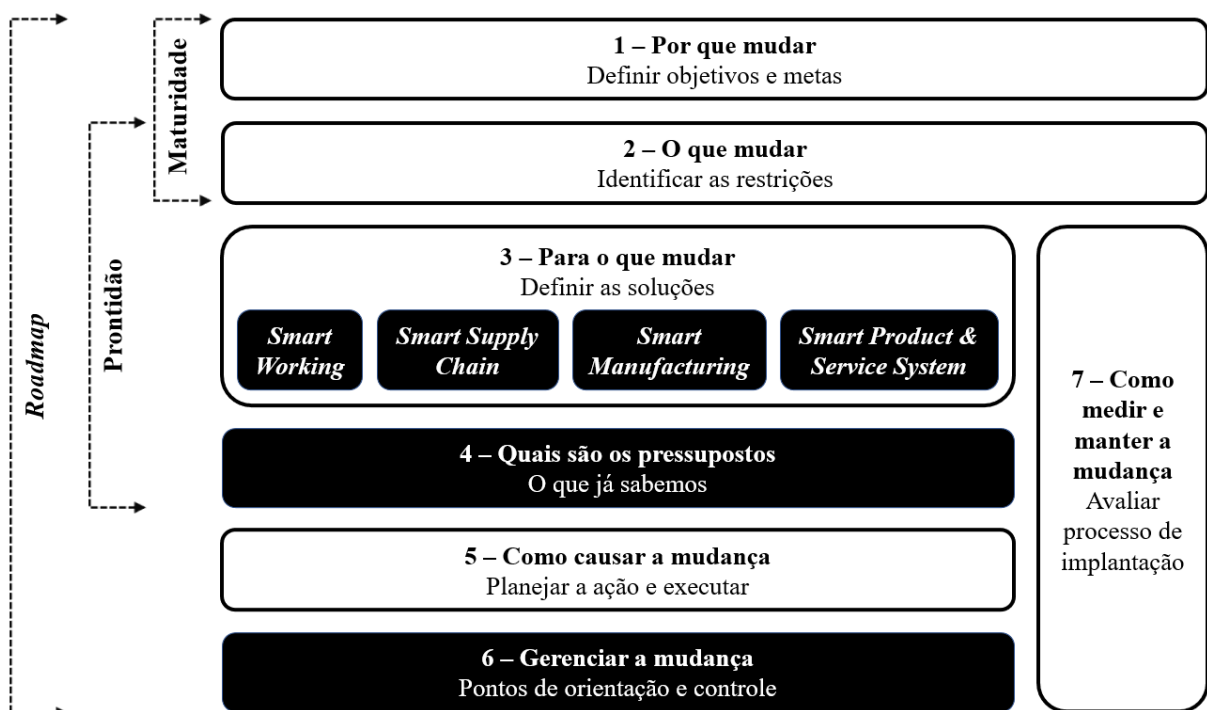


Figura 2.4 – Modelo conceitual proposto para PMEs. Adaptado de Cox III e Schleier Jr. (2013) e Frank et. al. (2019a)

2.4.1 Por que mudar: definindo os objetivos da PME

O primeiro ponto da pesquisa que se destaca, é o fato de que a maioria das decisões pela implantação de novas soluções tecnológicas foram tomadas por proprietários ou diretores das referidas empresas, o que já era esperando para as PMEs. O detalhe importante é que, mesmo todos informando que possuíam formação universitária, e respondendo pela gestão estratégica das PMEs, também afirmaram não conhecer claramente o que é a I4.0, e mesmo assim, não buscaram por apoio, capacitação ou orientação externa para a tomada de decisão. A falta de conhecimento e a incerteza, quanto ao caminho a seguir ficam evidentes, na maioria dos

entrevistados, como o caso do Gerente Geral da Empresa C quando questiona: “[...] tem coisa nova aí no mercado, mas o que eu quero de fato para minha empresa?” Esta falta de conhecimento sobre o tema, associada a inexistência ou deficiência de um planejamento estratégico consistente que defina objetivos claros, podem se tornar mais complexos, com os custos mais elevados ou até coibir a adoção de soluções tecnológicas. Outro fator que confirma a falta de diretrizes estratégicas é a motivação e contexto analisado pelas empresas pesquisadas, para definir quais soluções tecnológicas implementar. Com exceção dos especialistas das Empresas E, e I (Quadro 2.3), que realizaram um diagnóstico e análise de contexto completos, todos os demais casos, ou não realizaram nenhuma análise, ou analisaram apenas necessidades pontuais, que podem ou não agregar valor ao negócio.

Sendo assim, dentre outros fatores relevantes para o sucesso da transformação digital, a adoção de novas tecnologias deve ocorrer de forma consistente e proposital em apoio aos objetivos estratégicos do negócio e ganhando valor com as tecnologias implementadas (Ghobakhloo e Iranmanesh 2021). Este primeiro passo busca esclarecer qual será a diretriz norteadora do processo de mudança (Colli et al., 2019), ou seja, qual será o objetivo estratégico definido pela PME que vai ao encontro do processo de transformação digital. Existem boas ferramentas capazes de explicitar o estado atual no qual a PME está inserida, e ainda, conduzir a empresa na definição do seu objetivo estratégico. Se a empresa ainda não tem claro seus objetivos estratégicos, pode utilizar o BPM (*Business Process Management*) para mapear toda a sua cadeia de valor envolvendo processos internos e externos. O BPM, como consolidação de uma série de disciplinas estruturadas, que traz consigo a melhor forma de gerenciar o (*re*)design de processos de negócios individuais, e de como desenvolver uma capacidade básica de gerenciamento de processos de negócios em organizações que atendem a uma variedade de propósitos e contextos (Scher e Hoffmann 2015). Dentre as potenciais barreiras ao processo de implantação da I4.0, durante a análise do contexto atual da organização, é fundamental considerar a disponibilidade de recursos financeiros da empresa para subsidiar a implantação, a cultura organizacional, a produção de produtos especializados, a capacidade da mesma em estabelecer alianças, assim como qual será o nível de participação dos seus funcionários. Desta forma a PME tomará decisões baseadas em diretrizes traduzidas em metas, conduzindo o processo de mudança de forma ativa, planejada e estruturada e não apenas reativa, por impulso e sem foco, pois decisões imaturas no processo de digitalização no ambiente de negócios podem ser desastrosas para as PMEs (Ghobakhloo e Iranmanesh 2021).

2.4.2 O que mudar: identificando as restrições

Cruzando os resultados obtidos entre os questionamentos realizados, durante as entrevistas, apontamentos de dados obtidos com fornecedores e documentos, percebe-se que, na maioria das empresas, ou não houve uma análise prévia para determinar quais processos demandam por investimentos em soluções da I4.0, ou quando houve foi direcionada para um processo específico visando tratar de problemas pontuais. Na Empresa A, o CEO concluiu que deveria implantar uma programação por APS no processo de dobra, pois “[. . .] a empresa tinha dificuldade em padronizar o processo”, o que foi uma decisão equivocada, pois a padronização de roteiros, tempos de ciclo e de *set up* são fundamentais na implantação destes sistemas. A Empresa C afirma não ter obtido sucesso em projeto de implantação de solução tecnológica. A Empresa atribuiu o fracasso a falta de padrões claros e documentados de trabalho, afirmação recorrente em outras empresas, o que demonstra que as empresas não avaliam o sistema produtivo de forma sistêmica e holística.

Nesse sentido, entendendo que a PME já tenha definido seus objetivos estratégicos, o próximo passo do modelo conceitual proposto procura identificar quais são os processos, que ao se beneficiarem com os investimentos em tecnologia contribuiriam, mais significativamente, para que a PME alcance estes objetivos. Em outras palavras, onde o investimento agregaria mais valor ao negócio. Para tanto a empresa terá que implementar um VSM (*Value Stream Mapping*) (Mittal et al., 2018; Meudt, Metternich e Abele 2017). O VSM é uma das ferramentas do *Lean Manufacturing*, filosofia disseminada pela Toyota que tem por objetivo mapear todos os processos da PME, iniciando pelos dados, informações e insumos que entram na empresa, passando pelos processos internos até a entrega do produto ou serviço ao cliente (Rother e Shook 1998). Nessa descrição, estudo recente orientado para PMEs propõe uma *framework* de implementação de VSM apoiado pela combinação de simulação de eventos discretos, simulação híbrida e simulação baseada em agentes, capazes de capturar os requisitos da I4.0 (Ferreira et al., 2022), utilizando o VSM convencional em planta única e porta a porta (Rother e Shook 1998), ou entre plantas em todos os níveis da organização (Womack e Jones 2011), conforme for a necessidade da abrangência da análise. Obviamente é necessário que a equipe de implantação disponha, dentre outras competências, a qualificação para realizar o VSM (Mouef et al., 2019). Definidas as restrições ao processo de implantação, a empresa terá documentada a sua disponibilidade de recursos técnicos, assim como quais processos de trabalho já estão padronizados.

2.4.3 Para o que mudar: definindo soluções

Ao analisar o Quadro 2.3 é possível observar que nove dos dez casos são oriundos da indústria. Destes, três iniciaram o processo de transformação digital pela adoção de sistemas de integração vertical, o que não significa que tenham seguido a um modelo de maturidade, pois todas relataram conduzir os projetos de implantação de forma intuitiva. As demais empresas se direcionaram para aplicações pontuais e bem particulares orientadas para Realidade Virtual e Aumentada, *Big Data Analytic*, robôs para movimentação de produtos e dispositivos para ampliação do conforto e desempenho do operador. Mesmo utilizando tecnologias recomendadas em cada dimensão *Smart*, os relatos sinalizam uma certa dificuldade na busca de potenciais fornecedores, muito caracterizada pela falta de conhecimento para realizar esta prospecção. Fato este enfatizado nos casos das Empresas A e G, onde a primeira desenvolveu a solução em parceria com o fornecedor, o que tornou o processo de implantação moroso e com muitas correções ao longo do processo. E a segunda, entende que o projeto em andamento precisa ir além do escopo definido desenvolvendo não apenas um novo produto, mas também um novo processo produtivo, para atender a este novo produto. No relato do especialista consultor da Empresa D, que desenvolve múltiplos projetos em empresas distintas, o mesmo descreve a aquisição de algumas soluções tecnológicas como “[...] observadas em feiras e eventos, onde a motivação e escolha da solução tecnológica ocorre com o objetivo de alinhar os processos com os concorrentes diretos da empresa”, ignorando qualquer forma de análise preliminar para validar a decisão. Seguindo o modelo conceitual proposto na Figura 2.4, nas quatro próximas seções são apresentadas sugestões de soluções tecnológicas para cada uma das dimensões *Smart* propostas por Frank, Delanogare e Ayala (2019a).

2.4.3.1 Soluções tecnológicas para a *Smart Manufacturing*

Analisados os dados e informações do VSM, a empresa terá a sua disposição os dados e informações necessárias para realizar o terceiro passo, que tem como objetivo definir qual dimensão *Smart* e soluções tecnológicas devem ser implantadas. Se o objetivo estratégico da PME estiver alinhado com a necessidade de fomentar o desenvolvimento da manufatura, a dimensão *Smart Manufacturing* tem como diretrizes fundamentais priorizar a tomada de decisão baseada em dados e informações em tempo real, gestão visual, incremento de performance, bem como o controle e adaptação dos processos de forma autônoma (Frank, Delanogare e Ayala 2019a; Schuh et al., 2017). Não é necessário que a PME consiga atingir a todos estes objetivos, pois a busca por soluções tecnológicas deve estar alinhada aos seus

objetivos estratégicos, infraestrutura e condições financeiras (Mittal et al, 2018). As PMEs que consolidarem o processo de integração vertical de forma estruturada implantando ERP, SCADA, MES e APS, já terão elementos substanciais para fomentar o incremento de performance, assim como para a avaliação da real necessidade de adoção de novas soluções tecnológicas (Tabim, Ayala e Frank 2021).

2.4.3.2 Soluções tecnológicas para o Smart Product & Service System

O desenvolvimento de *Smart Product & Service System* podem ser uma excelente porta de entrada para PMEs na I4.0. Para tanto, a empresa deverá orientar o desenvolvimento de seus produtos para o monitoramento, controle e otimização da experiência de uso, assim como disponibilizar novos serviços e sistemas de serviços junto ao produto. Trata-se de uma estratégia que pode reposicionar a empresa no mercado com um diferencial competitivo importante, ou mesmo permitir a abertura de novos negócios (Ayala et al., 2019). Outra possibilidade é desenvolver *Smart Product & Service System* em parceria com outras empresas, na qual uma forneça o produto e a outra os serviços (Ayala et al., 2019). A aplicação do sensoriamento, geolocalização, IoT e *Big Data* possibilitam o desenvolvimento de um produto diferenciado, onde é possível oferecer serviços integrados ao produto. Posteriormente com adição de inteligência artificial, a gama de serviços pode ser ampliada, assim como, a customização da experiência de uso do produto.

2.4.3.3 Soluções tecnológicas para o Smart Working

As empresas que se utilizam de processos manuais, que ainda não podem ser automatizados, mas que entendem que devem complementar ou ampliar a capacidade do operador podem orientar suas ações para a aplicação do *Smart Working*. Soluções tecnológicas como: sistema de monitoramento e controle de operação remoto, *smartwatches*, sensores de ambiente e máquina, assistente habilitado por voz, dispositivos vestíveis como exoesqueletos, sistemas de apoio a tomada de decisão, AGV (*Automated Guided Vehicle*), visão computacional aplicada a inspeção de qualidade e inteligência artificial aplicada a manutenção corretiva e preventiva, podem incrementar a capacidade do operador, assim como melhorar as condições de trabalho (Dornelles, Ayala e Frank 2021). A realidade virtual e aumentada tem potencial de aplicação em treinamentos, desenvolvimento de produtos e na manutenção.

2.4.3.4 Soluções tecnológicas para a Smart Supply Chain

Por fim, as PMEs que eventualmente definirem como seu objetivo estratégico, a necessidade de compartilhar dados e informações, com o propósito de antecipar eventos e mitigar o efeito chicote gerado pela demanda. Estas empresas devem migrar para estratégias orientadas para a *Smart Supply Chain* (Frank, Delanogare e Ayala 2019a). As soluções tecnológicas alinhadas com este objetivo são sistemas e plataformas digitais, utilizadas para o compartilhamento interno e externo de dados do gerenciamento dos estoques em tempo real. Estas soluções atuam sobre a cadeia de suprimentos proporcionando maior controle, integração, visibilidade, flexibilidade em resposta aos requisitos do cliente, assim como estoques e *lead time* de entregas menores (Son et al., 2021; Frank, Delanogare e Ayala 2019a).

2.4.4 Estabelecendo os pré-requisitos, planejando e executando as ações

Com exceção dos casos conduzidos por especialistas nas Empresas D, E I, a principal dificuldade relatada durante as entrevistas foi a inexistência ou deficiência de conhecimento, em relação a adoção de tecnologias da I4.0. Esta falta de conhecimento prévio acentuou outras barreiras já mencionadas na literatura como dificuldades em: identificar potenciais fornecedores, definir infraestrutura com tecnologias de base, contratação de profissionais qualificados, quebra de paradigmas na cultura organizacional, suporte de TICs e padrões de trabalho (Mittal et al., 2018; Mittal et al., 2019; Frank, Delanogare e Ayala 2019a; Tabim, Ayala e Frank 2021). A Empresa B, ao entender que as dificuldades que teria no processo de implantação iriam além dos aspectos técnicos, pois seria necessário quebrar paradigmas já enraizados na cultura da organização, criou uma área piloto com operadores selecionados, para testar as soluções tecnológicas a serem implementadas. Contudo apesar da prática ser recomendável (Tabim, Ayala e Frank 2021), a Empresa cometeu um equívoco, pois selecionou como piloto um processo pouco representativo da fábrica. A Empresa A na mesma linha de relato, argumenta que “[...] ainda tem sérios problemas de acuracidade nos dados coletados nos sistemas”, o que demonstra que, após a implantação da solução tecnológica, não houve um acompanhamento apropriado do uso da nova tecnologia.

A apresentação dos resultados (Quadro 2.3), sinaliza que a aquisição de soluções tecnológicas por PMEs podem ser mais efetivas em todas as dimensões *Smart* se seguir reiteradamente duas diretrizes: A aquisição de conhecimento sobre o assunto, seja por membros

da empresa ou pela contratação de serviços externos de apoio ao processo de implantação e o planejamento estruturado da execução (Mittal et al., 2018; Mouef et al., 2017; Ghobakhloo e Iranmanesh 2021) A primeira diretriz vai ao encontro da busca por subsidiar a tomada de decisão apoiada no conhecimento existente, ou seja, conhecimento dos pré-requisitos para implantação, a segunda consiste em alinhar este conhecimento com o estado atual e objetivos definidos pela PME de modo a elaborar o planejamento das ações. Na literatura há várias ferramentas capazes de estruturar o planejamento das ações, mas como o projeto foi bem estruturado nas seções anteriores, e tendo em vista que, nem sempre as PMEs dispõem de pessoas qualificadas para a condução de projetos desta natureza, o método mais simples será utilizar o Plano de Ação (5W2H) (Daychoum 2018). O 5W2H busca responder a: o que, quando, onde, por que e como fazer, quem fará e quanto custará desdobrando em tantos níveis quantos foram necessários. Na próximas seções serão apresentados os principais pré-requisitos e planejamento das ações (o que fazer), questionamentos quatro e cinco do modelo conceitual proposto, em cada uma das dimensões *Smart*.

2.4.4.1 Pré-requisitos e planejamento de ações para a *Smart Manufacturing*

A integração vertical de sistemas descrita por Frank, Delanogare e Ayala (2019a) e Tabim, Ayala e Frank (2021), certamente é a melhor alternativa para PMEs que optarem pela adoção de soluções tecnológicas alinhadas com a *Smart Manufacturing*, para tanto foram definidos quatro pré-requisitos básicos a serem observados. No primeiro a empresa deve dispor de um bom nível de mecanização dos processos, sejam eles automatizados ou então passíveis de sensorização, pois uma das demandas é promover a integração das TICs com as tecnologias da automação (Tabim, Ayala e Frank 2021). Para atender ao segundo requisito é importante que a empresa tenha seus processos estruturados em trabalho padronizado (Mittal et al., 2018), sendo conhecidas as operações, tempos de ciclo e de *set up*, assim como os roteiros de produção e fluxos de informação, prática usual no *Lean Manufacturing* (Dennis 2009). Para atender ao terceiro requisito, a empresa deve ter um sistema ERP compatível com os processos da empresa, onde produtos, operações, roteiros de produção e tempos estão apropriadamente cadastrados e atualizados. O quarto requisito assegura que a infraestrutura de TI (*hardwares, softwares, servidores* ou computação em nuvem e sistemas de transmissão de dados), IoT, sejam compatíveis com os incrementos de soluções tecnológicas previstos no processo de integração vertical, ou estejam aptos a receberem um *upgrade* se necessário, pois a infraestrutura e a qualidade do *Big Data* são dois requisitos fundamentais no processo de digitalização (Frank,

Delanogare e Ayala 2019a).

Dessa maneira, a primeira ação a ser planejada, caso ainda não tenha sido realizada na definição dos objetivos, será a implementação de um VSM porta a porta, para que se conheça ou confirme o fluxo de informações, operações, roteiros e tempos do sistema produtivo. Este VSM confirmará ou fornecerá as informações de cadastro do sistema ERP, assim como informará quais recursos devem ser monitorados pela integração vertical no sistema produtivo. Caso a empresa ainda não tenha um sistema ERP, tanto o BPM como o VSM serão úteis para definir o *software* mais adequado para os processos da empresa (Ahmad e Cuenta 2013). Assim, aquisição de qualquer solução tecnológica deve sempre ser avaliada em mais de um fornecedor, sendo que a solução escolhida deve atender não apenas aos objetivos definidos inicialmente, mas também estejam alinhadas com os processos identificados no VSM (Daneshgar, Low e Lugkana 2013). Outra ação importante que precisa ser planejada consiste em qualificar um profissional interno ou contratar um serviço terceirizado com domínio sobre as TICs (tecnologias da informação e comunicação) e, que de preferência entenda a dinâmica dos processos da empresa (Mittal et al., 2019; Mouef et al., 2019). Com o objetivo de atender a primeira diretriz mencionada anteriormente, o gestor de projeto deve assegurar que a equipe de implantação disponha do conhecimento mínimo necessário, para atuar no processo de implantação das soluções tecnológicas, ou ainda, contratar consultoria especializada, ou realizar parcerias com outras empresas e instituições (Mittal et al., 2018; Müller, Buliga e Voigt 2018; Tabim, Ayala e Frank 2021; Benitez, Ayala e Frank 2020). A próxima ação a ser planejada será prospectar os potenciais fornecedores de sistemas de integração vertical (SCADA, MES e APS) (Mantravadi et al., 2022; Daneshgar, Low e Lugkana 2013). No mercado existem fornecedores com soluções mais simples e mais elaboradas, mas o que importa de fato é investigar:

- quais fornecedores conseguem oferecer soluções alinhadas com os indicadores dos processos descritos no VSM;
- as informações e indicadores gerados fornecem uma visão sistêmica e holística da performance dos processos da empresa;
- a estratificação destas informações e indicadores contribuem para que se chegue a causa raiz dos problemas, assim como permitem identificar oportunidades de melhoria e situação de entrega de produtos e pedidos;
- a nova solução tecnológica é de fácil integração com as tecnologias já existentes na empresa ou que ainda estejam em processo de aquisição;
- o fornecedor disponibiliza um bom serviço de suporte ao usuário na resolução de problemas.

Na última ação, após a sensorização das máquinas não automatizadas, o sistema supervisor e o MES são instalados, e posteriormente, todos os usuários devem ser capacitados no novo sistema (Mittal et al., 2019). A implantação do APS segue os mesmos passos do MES até a definição do fornecedor, pois posteriormente envolve essencialmente a equipe de TICs e de planejamento da produção (Bueno et al., 2020; Mouef et al., 2017). Para a implantação do APS é necessário que a empresa tenha pelo menos um profissional na equipe, que tenha domínio, acerca do módulo de produção no sistema ERP, assim como excelente conhecimento do sistema produtivo e práticas comerciais da empresa.

2.4.4.2 *Pré-requisitos e planejamento de ações para o Smart Product & Service System*

As PMEs que optarem pelo desenvolvimento de *Smart Product & Service System* também precisaram observar alguns pré-requisitos importantes. Dentre eles, dois já foram mencionados anteriormente, a implementação do BPM e do VSM. O primeiro, para que a empresa tenha clareza, quanto ao posicionamento de seus produtos no mercado, no que se refere a aceitação de seus atributos e ciclo de vida (Lei e Monn 2015) e o segundo, para que a empresa analise seus processos reiterando o seu conhecimento, quanto a capacidade e flexibilidade do seu sistema produtivo. Complementando as análises resultantes destas duas ferramentas é necessário que a empresa conheça claramente os requisitos, nos quais agregam valor ao produto na percepção do cliente (Gautam e Singh 2008). Para tanto a PME deve traduzir as necessidades latentes dos clientes em expressões técnicas passíveis de serem projetadas, planejadas e produzidas pela indústria. O QFD (*Quality Function Deployment*) é uma ferramenta composta por quatro fases e quatro matrizes, que permite reunir na mesma análise, elementos tangíveis e intangíveis tratados com atributos que traduzem as necessidades do cliente (Mantravadi et al., 2022; Lai e Ming 2002; Bossert 1991). O último requisito relevante é a formação de uma equipe multidisciplinar de projeto de produtos e serviços criativa, versátil e com conhecimento de soluções tecnológicas distintas (D'souza, 2016), assim como do sistema produtivo da empresa.

Neste contexto, atendidos todos os pré-requisitos mencionados, a primeira ação a ser planejada, se necessário, será realizar o reprojeto do produto (Gautam e Singh 2008), ou simplesmente realizar o sensoriamento do produto já desenvolvido e a instalação do sistema supervisor (SCADA) para captura dos sinais enviados pelos sensores (Tabim, Ayala e Frank 2021). A coleta e armazenamento de dados em nuvem por IoT em tempo real permitirá oferecer serviços de notificações de uso, manutenção corretiva e preventiva e monitoramento de eficiência energética. Na segunda fase, com a adição de inteligência artificial, M2M, robótica,

dispositivos de rastreamento e outras soluções tecnológicas o *Smart Product & Service System* estará configurado para conduzir tarefas de forma autônoma (Frank, Delanogare e Ayala 2019a; (Schuh et al., 2017)). O incremento de soluções tecnológicas nesta fase representam um desembolso financeiro mais significativo, mas não impossível se a PME formar parcerias com outros fornecedores de tecnologias (Ayala, Gerstlberger e Frank 2019), universidades, institutos de pesquisa e fomento a inovação.

2.4.4.3 *Pré-requisitos e planejamento de ações para o Smart Working*

Os pré-requisitos para a análise do *Smart Working* devem considerar algumas ferramentas adicionais, pois o foco da análise está centrado na relação das pessoas com as tarefas que executam. Sendo assim, além da implementação e análise de um VSM porta a porta visando entender claramente o processo, também é importante realizar uma Análise Ergonômica do Trabalho (AET) e uma Análise Preliminar de Riscos (APR) (Mas e Marzal, 2014; Lida e Buarque 2016; Guérin, Kerguelen e Laville, 2001). A AET contribui para a análise de posturas inadequadas no trabalho causadoras de doenças ocupacionais que, dependendo do caso pode-se testar a utilização de exoesqueletos para melhorar a postura e incrementar a força do operador, principalmente no levantamento de peso e trabalho aéreo (Calzavara et al., 2020), assim como outras tecnologias que podem contribuir neste sentido. Outra contribuição significativa do *Smart Working* será a aplicação de soluções tecnológicas para eliminar os riscos ocupacionais (Klumpp et al., 2019) sinalizados no APR, nos quais em algumas situações, o trabalhador está exposto regularmente. Assim, como a adoção de soluções tecnológicas, já citadas anteriormente, que maximizam e qualificam a capacidade de quem as utiliza (Dornelles, Ayala e Frank 2021).

2.4.4.4 *Pré-requisitos e planejamento de ações para a Smart Supply Chain*

Se para empresas de grande porte não é economicamente saudável a manutenção de grandes estoques, sejam de produtos acabados ou insumos produtivos, para as PMEs esta prática pode ser ainda mais nociva. Neste caso, as PMEs podem optar pela adoção de soluções tecnológicas aplicadas a *Smart Supply Chain* para otimizar a gestão de seus estoques. A solução mais usualmente utilizada, são as plataformas digitais de compartilhamento de dados, pois permitem que uma empresa faça a gestão do estoque de outra acessando sua base de dados (Frank, Delanogare e Ayala 2019a). Todos os pré-requisitos e ações mencionadas na *Smart*

Manufacturing, que dizem respeito a infraestrutura de TICs como: *hardwares*, *softwares*, servidores, sistemas de transmissão de dados ou computação em nuvem, IoT, usuário chave dos sistemas e seleção do sistema ERP devem ser implementados da mesma forma (Frederico, Reyes e Kumar 2020). A diferença reside no fato de que esta dimensão *Smart* utiliza o módulo de suprimentos do ERP e tem como foco o estoque de produtos acabados e insumos produtivos. Outro pré-requisito que se repete é a necessidade de realização de um VSM, mas nesta dimensão diferentemente das anteriores precisa ser um VSM planta a planta (Womack e Jones 2011; Ferreira et al., 2022).

Destarte, com a infraestrutura de TICs apropriada e de posse do VSM, a empresa pode identificar com qual de seus parceiros (fornecedor ou cliente) deseja estabelecer uma gestão compartilhada dos estoques de produtos acabados ou insumos produtivos. O compartilhamento de dados deve proporcionar a redução dos custos com estoque e aumento do nível de serviço (Frederico, Reyes e Kumar 2020). Para de maneira coercitiva e desencorajar a prática do oportunismo de compradores membros da cadeia de suprimentos alertada por Son et al. (2021), a partir do momento que se tem acesso aos dados do fornecedor, se faz necessário a adoção de um contrato legal formal, que estabeleça a governança contratual, compromissos das partes e medidas de cibersegurança de forma detalhada. Em empresas de médio porte, além do compartilhamento de dados dos sistemas ERP em plataforma, a empresa também pode instalar e promover o compartilhamento de parte dos dados de sistemas WMS (*Warehouse Management System*) (Baruffaldi, Accorsi e Manzini 2019). Desta forma, será possível não apenas realizar a gestão dos estoques a distância, mas também a posição do carregamento: preparação, carregamento ou em rota de entrega. A adoção de um sistema WMS segue os mesmos requisitos recomendados para os sistemas ERP.

2.4.5 Como gerenciar a mudança: pontos de orientação e controle

No que tange a gestão dos projetos de implantação das soluções tecnológicas, as Empresas A, B, C tinham uma expectativa elevada, em relação aos fornecedores, mas analisando os relatos percebe-se que houveram lacunas de ambas as partes na condução dos projetos. Assim, o entrevistado consultor da Empresa D entende que deve assumir não apenas o escopo, mas também o cronograma de implantação para mitigar falhas e estabelecer planos de contingência. Todos os entrevistados relataram deficiências e oportunidades de melhoria, no processo de gestão dos projetos de implantação, tais como: definir o gestor do projeto; estruturar

o projeto em etapas factíveis de serem acompanhadas; criar ou melhorar as reuniões de alinhamento entre as equipes envolvidas e evitar a tomada de ações de modo unilateral.

Estruturado o projeto de implantação das soluções tecnológicas da I4.0 nas PMEs, se faz necessário observar algumas orientações e controles relevantes. Estas orientações e controle tem o intuito de reforçar elementos fundamentais do projeto. Há alguns pontos de orientação e controle que se aplicam a quase todos os *Smarts*. O primeiro e possivelmente o mais importante ponto de orientação, o gestor do projeto deve assegurar que toda a equipe de implantação tenha conhecimento sobre as soluções tecnológicas a implantar e o método de aplicação das ferramentas citadas, ou contratar profissional especializado (Mittal et al., 2018; Müller, Buliga e Voigt 2018; Tabim, Ayala e Frank 2021; Benitez, Ayala e Frank 2020). Nas dimensões *Smart Product & Service System* (SPSS), *Smart Manufacturing* (SM) e *Smart Supply Chain* (SSC), como muitas PMEs não dispõem de uma área de TICs estruturada e, para tanto utilizam serviços terceirizados é fundamental, que durante a implementação dos projetos as empresas assegurem o dimensionamento e qualidade dos serviços de instalação de redes, *hardwares*, espaço em nuvem ou servidor e IoT compatíveis com as necessidades dos próximos níveis. A escolha da solução tecnológica deve ser orientada por critérios técnicos alinhados com os objetivos e necessidades da empresa, analisando mais de um fornecedor, mas nunca apenas por critérios financeiros (Daneshgar, Low e Lugkana 2013).

Para as SSC e SM é fundamental assegurar que os cadastros solicitados, em cada dimensão sejam inseridos e atualizados adequadamente, pois do contrário a falta de cadastros ou de atualização irá inviabilizar a evolução de etapas posteriores de implantação (Shojaeinasab et al., 2022). Em todas as dimensões é importante verificar a compatibilidade de integração entre *softwares* e *hardwares*, assim como assegurar a atualização tecnológica e a constante capacitação da equipe (Daneshgar, Low e Lugkana 2013). No *Smart Working* é importante observar se a adição de soluções tecnológicas, além maximizar a capacidade do operador, ela piorou, manteve ou melhorou as condições de trabalho, o que pode ser avaliado pela AET e APR.

2.4.6 Como medir e manter a mudança: avaliando o processo de implantação

Todas as nove empresas entrevistadas identificaram lacunas significativas, ou seja, oportunidades de melhoria em seus processos de adoção de soluções tecnológicas rumo a I4.0 nas avaliações pós-implantação. Estas oportunidades de melhoria foram comentadas nas seções

anteriores e invariavelmente, todas confirmam que, ou os projetos de implantação não tinham um caminho claro, ou tinham um caminho definido, mas poderiam ser aprimorados preenchendo as lacunas identificadas.

Tendo em vista as singularidades das PMEs já mencionadas anteriormente, o que pode tornar cada contexto único (Mittal et al., 2018), para a avaliação do projeto de implementação não será necessária a elaboração de modelos formais quantitativos de maturidade ou prontidão. Ao implementar os tópicos 1 e 2, definir objetivos e traduzi-los em metas (Por que mudar) e, identificar as restrições (O que mudar), apresentados no modelo conceitual na Figura 2.4, a PME estará realizando um cotejo entre o contexto desejado (objetivos futuros) e, o contexto atual com as potenciais restrições para o atingimento do objetivo planejado, assim, estará avaliando o seu nível de maturidade. Utilizando as ferramentas mencionadas nos tópicos supramencionados, será possível investigar todas as potenciais restrições ao processo de implantação de I4.0, já mencionadas por Mittal et. al. (2018), a saber: financeiras, culturais, disponibilidade de recursos técnicos, padrões de trabalho, produtos especializados, participação dos funcionários e alianças e colaboração. O objetivo das recomendações apresentadas, neste estudo, é fornecer subsídios para que as PMEs possam iniciar o seu processo de transformação, partindo do nível zero de maturidade, que correspondem as tecnologias que precedem o *Big Data*, *IoT*, *Data Analytics* e a *Cloud Computer*, e inicie a adoção de tecnologias que sucedem as tecnologias em cada uma das quatro dimensões das Smart.

Da mesma forma, os tópicos 2, 3 e 4, a saber: identificar restrições, potenciais soluções e conhecer os pré-requisitos (Por que mudar, para o que mudar e quais são os pré-requisitos), produzem dados e informações relevantes para que a empresa tenha condições de avaliar o seu nível de prontidão. A principal métrica de avaliação da evolução efetiva do projeto de implantação será a superação de cada etapa proposta no modelo conceitual, pré-requisitos informados, bem como, dos pontos de controle e orientação, conforme proposto no modelo apresentado na Figura 2.4, pois o modelo proposto permite integrar um *roadmap* a uma 'avaliação de prontidão' com um 'modelo de maturidade' (Mittal, Romero e Wuest 2018).

2.5 Conclusões

2.5.1 Contribuições teóricas

Com o objetivo de considerar as singularidades das PMEs e reduzir a complexidade, em

torno da implantação de soluções tecnológicas da I4.0, este artigo propõe um modelo de *roadmap* alinhado, com as quatro macros dimensões de aplicação propostas por Frank, Delanogare e Ayala (2019a). Além do fracionamento nas quatro dimensões *Smarts*, o modelo conceitual proposto considera as três lacunas identificadas por Mittal et al. (2018), uma vez que a aplicação do processo de pensamento da TOC permite que sejam criados *roadmaps* sob medida para cada empresa, além de possuir uma sistemática de autoavaliação integrada ao modelo, e considerar as tecnologias das revoluções industriais anteriores (nível zero). Assim como ratifica a necessidade de aquisição de conhecimento, amplamente discutido na literatura, visando assegurar assertividade no processo de implantação da I4.0 (KAHLE et al., 2020; BENITEZ, AYALA E FRANK 2020; MOUEF et al., 2019; TORTORELLA et al., 2020; MITTAL et al., 2018).

Os resultados da análise das entrevistas confirmam pesquisas anteriores, nas quais as PMEs carecem muito mais de um direcionamento alinhado com suas singularidades (Mittal et al., 2018; Ghobakhloo et. al., 2021; Mouef et al., 2017), do que apenas melhores condições financeiras para iniciarem a jornada rumo I4.0. O estudo também demonstra que o conhecimento em torno do assunto, ainda é incipiente e, que os modelos de gestão adotados nessas empresas, ainda não estão preparados para este novo cenário industrial que se apresenta. As observações realizadas dão conta da necessidade, de que se fomente ainda mais políticas públicas, pesquisas de apoio, assim como linhas de financiamento voltadas para PMEs. Por fim, a constatação de que a falta de ação, ou a ineficácia nos resultados, são diretamente proporcionais a falta de conhecimento e planejamento das ações de implantação.

2.5.2 Implicações práticas

Este estudo pode contribuir para a disseminação deste novo modelo de industrialização entre as PMEs. Entendendo que este novo modelo é um caminho sem volta, no qual todas as empresas terão que se adaptar em momento oportuno, o estudo fornece caminhos distintos, para o processo de transformação digital. O *roadmap* proposto apresenta um passo a passo, para que gestores de projetos de PMEs tenham condições de planejar o processo de implantação de I4.0 de forma customizada, alinhando os objetivos da empresa, tecnologias disponíveis e singularidades da organização.

2.5.3 Limitações e pesquisas futuras

Este estudo apresenta algumas limitações que abrem caminhos para novas pesquisas. Dentre estas limitações, mesmo aplicando a pesquisa em empresas de segmentos distintos, o espaço amostral do estudo pode ser ampliado, o que pode conduzir a melhores reflexões. Ainda na mesma linha, todas as empresas ou estavam iniciando ou já tinham consolidado o processo de transformação digital. Ao que se entende que, talvez seja oportuno colocar um grupo de empresas na amostra para posterior cruzamento dos dados, que tenham interesse na digitalização de seus processos, mas que ainda não tenham iniciado o processo considerando-as como marco zero do processo de digitalização. Como potencial pesquisa futura ficou claro, durante as entrevistas, a dificuldade que os gestores do processo de transformação digital tiveram para promover a integração das equipes de trabalho. Mesmo todos os entrevistados possuindo formação superior e com relativa experiência, todos relataram alguma dificuldade em realizar a gestão de projeto de adoção de soluções tecnológicas, o que abre espaço, para o estudo de um modelo de gestão de projetos, para a implantação de soluções tecnológicas orientadas para a I4.0.

2.6 Referências

- Abramovici, M., Göbel, J. C., & Dang, H. B. (2016). “Semantic data management for the development and continuous reconfiguration of smart products and systems”, *CIRP Annal* 65(1): 85-188, doi:org/10.1016/j.cirp.2016.04.051
- Ahmad, M. M., & Cuenca, R. P. (2013). “Critical success factors for ERP implementation in SMEs”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(3): 104-111, doi:org/10.1016/j.rcim.2012.04.019
- Akdil, K. Y., Ustundag, A., & Cevikan, E. (2018). “Maturity and readiness model for Industry 4.0 strategy”. In: *Industry 4.0: Managing the digital transformation. Springer Series in Advanced Manufacturing*. Springer, Charm. doi:org/10.1007/978-3-319-57870-5_4
- Anderl, R., Picard, A., Wang, Y., Fleischer, J., Dosch, S., Klee, B., & Bauer, J. (2015). “Guideline Industry 4.0 - guiding principles for the implementation of Industry 4.0 in small and medium sized businesses”. *VDMA Forum Industrie*. Vol. 4. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Guideline%20industrie%204.0-guiding%20principles%20for%20the%20implementation%20of%20industrie%204.0%20in%20small%20and%20medium%20sized%20businesses&author=R.%20Anderl&publication_year=2015
- Ayala, N. F., Wolfgang, W., & Frank, A. G. (2019). “Managing servitization in product companies: The moderating role of service suppliers”, *International Journal of Operations &*

Production Management, 39(1): 43-74. doi:org/10.1108/IJOPM-08-2017-0484

Baruffaldi, G., Accorsi, R., & Manzini, R. (2019). “Warehouse management system customization and information availability in 3pl companies: A decision-support tool”, *Industrial Management & Data Systems*, 119(2): 251-273. doi:org/10.1108/IMDS-01-2018-0033

Benitez, G. B., Ayala, Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2020). “Industry 4.0 innovation ecosystems: An evolutionary perspective on value cocreation”, *International Journal of Production Economics*, 228, doi:org/10.1016/j.ijpe.2020.107735

Bossert, J. L. (1991). “Quality Function Deployment: A practitioner's approach” (1st ed.). *CRC Press*. doi:org/10.1201/9781003066545

Branco, I. C., Jesus, F. C., & Oliveira, T. (2019). “Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union”, *Computers in Industry*, 107: 22-32, doi:org/10.1016/j.compind.2019.01.007

Büchi, G., Cugno, M., & Castagnoli, R. (2020). “Smart factory performance and Industry 4.0”, *Technological Forecasting and Social Change*, 150, doi:org/10.1016/j.techfore.2019.119790

Bueno, A., Filho, M., & Frank, A. G. (2020). “Smart production planning and control in the Industry 4.0 context: A systematic literature review”, *Computers & Industrial Engineering*, 149, doi:org/10.1016/j.cie.2020.106774

Calzavara, Martina. Bogataj, David. Battini, Sgarbossa, Daria Fabio and Ilenia Zennaro. 2020. “Ageing workforce management in manufacturing systems: state of the art and future research agenda” *Jornal International Journal of Production Research*, 58(3), 729-747. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1600759>

Centobelli, P., Converso, G., Santillo, L. C. & T. Murino, T. 2015. “Flow shop scheduling algorithm to optimize warehouse activities”, *International Journal of Industrial Engineering Computations*. doi:org/10.5267/j.ijiec.2015.8.001

Ceschin, F. (2013). “Critical factors for implementing and diffusing sustainable product-Service systems: insights from innovation studies and companies' experiences”, *Journal of Cleaner Production*, 45: 74-88, doi:org/10.1016/j.jclepro.2012.05.034

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, doi:org/10.1016/j.arcontrol.2019.06.001

Cox III, J. F., & Jr, J. G. S. (2013). “Theory of Constraints Handbook”. Porto Alegre : Bookman. [https://books.google.com.br/books?id=gyE4AgAAQBAJ&lpg=PR3&ots=GYaxVZS5Xt&dq=Cox%20III%2C%20James%20F.%20Jr%2C%20John%20G.%20Schleier.%20Theory%20of%20Constraints%20Handbook.%20\(2013\).%20Porto%20Alegre%20%3A%20Bookman%2C%202013.&lr&hl=pt-BR&pg=PR3#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=gyE4AgAAQBAJ&lpg=PR3&ots=GYaxVZS5Xt&dq=Cox%20III%2C%20James%20F.%20Jr%2C%20John%20G.%20Schleier.%20Theory%20of%20Constraints%20Handbook.%20(2013).%20Porto%20Alegre%20%3A%20Bookman%2C%202013.&lr&hl=pt-BR&pg=PR3#v=onepage&q&f=false)

Culot, G., Orzes, G., Sartor, M., & Nassimbeni, G. (2020). “The future of manufacturing: A Delphi-based scenario analysis on Industry 4.0”, *Technological Forecasting and Social*

Change, 157, 120092, doi:org/10.1016/j.techfore.2020.120092

Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2018). “The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance”, *International Journal of Production Economics*, 204: 383-394, doi:org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019

Daneshgar, F., Low, G. C., & Worasinchai, L. (2013). “An investigation of ‘build vs. buy’ decision for software acquisition by small to medium enterprises”, *Information and Software Technology*, 55(10): 1741-1750, doi:org/10.1016/j.infsof.2013.03.009

Daychoum, M. (2018). *40+ 20 “Ferramentas e técnicas de gerenciamento”*. Brasport. <https://books.google.com.br/books?id=VIRYDwAAQBAJ&lpg=PA1&ots=oDDQmw3iXX&dq=livro%205w2h&lr&hl=pt-BR&pg=PA1#v=onepage&q=livro%205w2h&f=false>

Dennis, P. (2009). “Produção lean simplificada”. *Bookman Editora*. <https://books.google.com.br/books?id=V8hK2KJjwsQC&lpg=PA7&ots=9vxBycisdT&dq=livro%20produ%C3%A7%C3%A3o%20lean%20simplificada&lr&hl=pt-BR&pg=PA7#v=onepage&q=livro%20produ%C3%A7%C3%A3o%20lean%20simplificada&f=false>

Dornelles, J. A., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2021). “Smart working in Industry 4.0: How digital technologies enhance manufacturing workers' activities”, *Computers & Industrial Engineering*, 163: 107804, doi:org/10.1016/j.cie.2021.107804

D'souza, N. (2016). “Investigating design thinking of a complex multidisciplinary design team in a new media context: Introduction”, *Design Studies*, 46: Pages 1-5, doi:org/10.1016/j.destud.2016.07.001

Eisenhardt, K. M., & Graebner, M. E. (2007). “Theory building from cases: Opportunities and challenges”. *Academy Management Journal* 50, 25–32. <http://www.jstor.org/stable/20159839>

Ferreira, W. P., Armellini, F., Santa-Eulalia, L. A., & Thomasset-Laperrière, V. (2022). “Extending the lean value stream mapping to the context of Industry 4.0: An agent-based technology approach”, *Journal of Manufacturing Systems*, 63: 1-14, doi:org/10.1016/j.jmsy.2022.02.002

Frank, A. G., Delanogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019a). “Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies”, *International Journal of Production Economics*, 210: 15-26, doi:org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004

Frank, A. G., Mendes, G. H. S., Ayala, N. F. & Ghezzi, A. (2019b). “Servitization and Industry 4.0 convergence in the digital transformation of product firms: A business model innovation perspective”, *Technological Forecasting and Social Change*, 141: 341-351, doi:org/10.1016/j.techfore.2019.01.014

Frederico, G.F., Garza-Reyes, J.A., Anosike, A. & Kumar, V. (2020). “Supply chain 4.0: Concepts, maturity and research agenda”, *Supply Chain Management*, 25(2): 262-282. doi:org/10.1108/SCM-09-2018-0339

Ganzarain, J., & Errasti, N. (2016). “Three stage maturity model in SME’s toward Industry

4.0". *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(5): 1119-1128. dx.doi.org/10.3926/jiem.2073

Gautam, N., & Gautam, N. S. (2008). "Lean product development: Maximizing the customer perceived value through design change (redesign)", *International Journal of Production Economics*, 114(1): 313-332, doi:org/10.1016/j.ijpe.2006.12.070

Geissbauer, R., Vedso J., & Schrauf, S. (2018). *Industry 4.0: building the digital Enterprise: 2016 global industry 4.0 survey Retrieved April 2018 from Munich*. <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>

Ghobakhloo, M., & Iranmanesh, M. (2021). "Digital transformation success under Industry 4.0: a strategic guideline for manufacturing SMEs", *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32(8): 1533-1556. doi:org/10.1108/JMTM-11-2020-0455

Gökalp, E., Sener, U., & Eren, P. E. (2017). "Development of an assessment model for Industry 4.0: Industry 4.0 – MM. *Communications in Computer and Information Science*, 770. Springer, Charm. doi:org/10.1007/978-3-319-67383-7_10

Goldratt, E. M. (1990). "What Is This Thing Called Theory of Constraints and How It Should Be Implemented?" New York, North River Press. <http://brharnetc.edu.in/br/wp-content/uploads/2018/11/5.pdf>

Guérin, F., Laville, A., Daniellou, F., Duraffourg, J., & Kerguelen, A. (2001). "Compreender o trabalho para transformá-lo: a prática da ergonomia". *Editora Blucher*. <https://books.google.com.br/books?id=qkniDwAAQBAJ&lpg=PR5&ots=-0SaxwgO6g&dq=GU%C3%89RIN%2C%20F.%3B%20LAVILLE%2C%20A.%3B%20DANIELLOU%2C%20F.%3B%20DURAFFOURG%2C%20J.%3B%20KERGUELEN%2C%20A.%20Compreender%20o%20trabalho%20para%20transform%C3%A1-lo%3A%20a%20pr%C3%A1tica%20da%20ergonomia.%20S%C3%A3o%20Paulo%3A%20Edgard%20Blucher%3A%20Fundação%20Vanzolini%2C%202001.&lr&hl=pt-BR&pg=PR5#v=onepage&q=GU%C3%89RIN,%20F.:%20LAVILLE,%20A.:%20DANIELLOU,%20F.:%20DURAFFOURG,%20J.:%20KERGUELEN,%20A.%20Compreender%20o%20trabalho%20para%20transform%C3%A1-lo:%20a%20pr%C3%A1tica%20da%20ergonomia.%20S%C3%A3o%20Paulo:%20Edgard%20Blucher:%20Fundação%20Vanzolini,%202001.&f=false>

Guo, D., Zhong, R. Y., Lin, P. Lyu, Z., Rong, Y., & Huang, G. Q. (2020). "Digital twin-enabled graduation intelligent manufacturing system for fixed-position assembly islands", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 63: 101917, doi:org/10.1016/j.rcim.2019.101917

Hofmann, E., & Rüsch, M. (2017). "Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics", *Computers in Industry*, 89: 23-34, doi:org/10.1016/j.compind.2017.04.002

Jung, K., Kulvatunyou, B., Choi, S., & Brundage, M. P. (2016). "An overview of a smart manufacturing system readiness assessment. In: Advances in production management systems. Initiatives for a sustainable world. IFIP". *Advances in information and communication*

technology, 488. Springer, Charm. doi:org/10.1007/978-3-319-51133-7_83

Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). “Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Securing the future of German manufacturing industry”. Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. Acatech, Forschungsunion. <https://docplayer.net/254711-Securing-the-future-of-german-manufacturing-industry-recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0.html>

Kahle, J. H., Marcon, E., Ghezzi, A., & Frank, A. G. (2020). “Smart products value creation in SMEs innovation ecosystems”, *Technological Forecasting and Social Change*, 156: 120024, doi:org/10.1016/j.techfore.2020.120024

Kannan, S. M., Suri, K., Cadavid, J., Barosan, I., Van Den Brand, M., Alferez, M., & Gerard, S. (2017). Towards industry 4.0: Gap analysis between current automotive MES and industry standards using model-based requirement engineering. In *2017 IEEE International Conference on Software Architecture Workshops (ICSAW)* (pp. 29-35). IEEE. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Towards%20industry%204.0%3A%20Gap%20analysis%20between%20current%20automotive%20MES%20and%20industry%20standards%20using%20model-based%20requirement%20engineering&author=S.M.%20Kannan&publication_year=2017

Kipper, L. M., Furstenau, L. B., Hoppe, D., Frozza, R., & Iepsen, S. (2020). “Scopus scientific mapping production in industry 4.0 (2011–2018): a bibliometric analysis”. *International Journal of Production Research* 58: 1605-1627, doi:org/10.1080/00207543.2019.1671625

Klumpp, M., Hesenius, M., Meyer, O., Ruiner, C., & Gruhn, V. (2019). “Production logistics and human-computer interaction—state-of-the-art, challenges and requirements for the future”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(9), 3691-3709. doi:org/10.1007/s00170-019-03785-0

Kowalkowski, C., Gebauer, H., & Oliva, R. (2017). “Service growth in product firms: Past, present, and future”, *Industrial Marketing Management*, 60: 82-88, doi:org/10.1016/j.indmarman.2016.10.015

Kumar, R., Singh, R. K., & Dwivedi, Y. K. (2020). “Application of industry 4.0 technologies in SMEs for ethical and sustainable operations: Analysis of challenges”, *Journal of Cleaner Production*, 275: 124063, doi:org/10.1016/j.jclepro.2020.124063

Lai, K. C., & Ming, L. W. (2002). “Quality Function Deployment: A Comprehensive Review of Its Concepts and Methods”, *Quality Engineering*, 15(1): 23-35, doi:org/10.1081/QEN-120006708

Lee, J., Jun, S., Chang, T.W. & Park, J. (2017). “A smartness assessment framework for smart factories using analytic network process”. *Sustainability*. 9(5):794. doi:org/10.3390/su9050794

Lei, N., & Monn, S. K. (2015). “A Decision Support System for market-driven product positioning and design”, *Decision Support Systems*, 69: 82-91, doi:org/10.1016/j.dss.2014.11.010.

Lichtblau, K. S., Bertenrath, R. B. V. Millack, A. M. et al. (2015). “IMPULS Industrie 4.0 –

readiness”. *Impuls-stiftung des VDMA, Aachen-koln* Retrieved April 2018 from 2015 <http://www.impuls-stiftung.de/documents/3581372/4875835/Industrie+4.0+Readiness+IMPULS+Studie+Oktober+2015.pdf/447a6187-9759-4f25-b186-b0f5eac69974>

Lida, I., & Buarque, L. (2016). “Ergonomia: projeto e produção”. *Editora Blucher*. <https://books.google.com.br/books?id=LcGPDwAAQBAJ&lpg=PA1&ots=iaPhNuEgGc&dq=IIDA%2C%20Itiro.%20Ergonomia%20Projeto%20e%20Produ%C3%A7%C3%A3o.%20%20C2%B0%20Edi%C3%A7%C3%A3o.%20S%C3%A3o%20Paulo%3A%20Edgard%20Bl%C3%BCcher%2C%202005.&lr&hl=pt-BR&pg=PA1#v=onepage&q=IIDA,%20Itiro.%20Ergonomia%20Projeto%20e%20Produ%C3%A7%C3%A3o.%20%20C2%B0%20Edi%C3%A7%C3%A3o.%20S%C3%A3o%20Paulo:%20Edgard%20Bl%C3%BCcher,%202005.&f=false>

Longo, F., Nicoletti, L., & Padovano, A. (2017). “Smart operators in industry 4.0: A human-centered approach to enhance operators’ capabilities and competencies within the new smart factory context”, *Computers & Industrial Engineering*, 113: 144-159, doi:org/10.1016/j.cie.2017.09.016

Mantravadi, S., Møller, C., Li, C., & Schnyder, R. (2022). “Design choices for next-generation IIoT-connected MES/MOM: An empirical study on smart factories”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 73: 102225, doi:org/10.1016/j.rcim.2021.102225

Martins, G. A. (2006). “Estudo de Caso: Uma estratégia de pesquisa”. São Paulo: Atlas. https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=Martins%2C+Gilberto+de+Andrade.%2C+2006.+Estudo+de+Caso%3A+Uma+estrat%C3%A9gia+de+pesquisa.+S%C3%A3o+Paulo%3A+Atlas.&btnG=

Martinez, V., Neely, A., Velu, C., Leinster- Evans, S., & Bisessar, D. (2017). “Exploring the journey to services”, *International Journal of Production Economics*, 192: 66-80, doi:org/10.1016/j.ijpe.2016.12.030

Mas, J. A. D., & Marzal, J. A. (2014). “Using Kinect™ sensor in observational methods for assessing postures at work”, *Applied Ergonomics*, 45(4): 976-985, doi:org/10.1016/j.apergo.2013.12.001

Meudt, T., Metternich, J. & Abele, E. (2017). “Value stream mapping 4.0: Holistic examination of value stream and information logistics in production”, *CIRP Annals*, 66(1): 413-416, ISSN 0007-8506, doi:org/10.1016/j.cirp.2017.04.005

Miguel, F. V. C. (2010). A entrevista como instrumento para investigação em pesquisas qualitativas no campo da linguística aplicada. *Revista odisseia*.

Miles, M. B., & Huberman, A. M. (1994). *Análise Qualitativa de Dados: Um Livro Fonte Expandido* (2ª ed.). Publicações SAGE. https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=U4IU_-wJ5QEC&oi=fnd&pg=PA10&ots=kFVG3KRS_P&sig=YhlgYsJeiKxLrnCn2Q11E70tPwc&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., & Wuest, T. (2018). “A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized

enterprises (SMEs)", *Journal of Manufacturing Systems*, 49: 194-214, doi:org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005

Mittal, S., Khan, M. A., Purohit, J. K., Menon, K., Romero, D., & Wuest, T. (2019). "A smart manufacturing adoption framework for SMEs", *International Journal of Production Research*, 58(5): 1555-1573, doi:org/10.1080/00207543.2019.1661540

Mouef, A., Simon, P., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., & Barbaray, R. (2017). "The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0", *International Journal of Production Research*, 56(3): 1118-1136, doi:org/10.1080/00207543.2017.1372647

Mouef, A., Simon, P., Lamouri, S., & et al. (2019). "Identification of critical success factors, risks and opportunities of Industry 4.0 in SMEs", *International Journal of Production Research*, 58(5): 1384-1400, doi:org/10.1080/00207543.2019.1636323

Müller, J. M., Buliga, O., Voigt, K.I. (2018). "Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0", *Technological Forecasting and Social Change*, 132: 2-17, doi:org/10.1016/j.techfore.2017.12.019

Müller, J. M., Buliga, O., Voigt, K.I. (2020). "The role of absorptive capacity and innovation strategy in the design of industry 4.0 business Models - A comparison between SMEs and large enterprises", *European Management Journal*, 39(3): 333-343, doi:org/10.1016/j.emj.2020.01.002

Ong, S.K., Yew, A.W.W., Thanigaivel, N.K., Nee, A.Y.C. (2020). "Augmented reality-assisted guorobot programming system for industrial applications", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, doi:org/10.1016/j.rcim.2019.101820

Oztemel, E., & Gursev, S. (2020). "Literature review of Industry 4.0 and related technologies". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 127–182, doi:org/10.1007/s10845-018-1433-8

Porter, M. E., & Heppelmann, J. E. (2015). "How smart, connected products are transforming companies" *Harvard Business School Rev.*, 1 https://boundarysys.com/wp-content/uploads/2021/03/HBR-How-Smart-Connected-Products-Are-Transforming-Companies.IK_.pdf

Prodanov, C. C., & Freitas, E. C. (2009). "Metodologia do trabalho científico: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico". Novo Hamburgo, RS: Feevale.

[https://books.google.com.br/books?hl=pt-](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=zUDsAQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA13&dq=Prodanov,+Cleber+C.,+Freitas,+Ernani+C.+de.+2009.+Metodologia+do+trabalho+cient%3%ADfico:+M%3%A9todos+e+t%3%A9nicas+da+pesquisa+e+do+trabalho+acad%3%AAmico.+Novo+Hamburgo,+RS:+Feevale.&ots=dc108fwcCO&sig=mOliuoU01c5gcPevEfdbrnJRVco#v=onepage&q&f=false)

[BR&lr=&id=zUDsAQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA13&dq=Prodanov,+Cleber+C.,+Freitas,+Ernani+C.+de.+2009.+Metodologia+do+trabalho+cient%3%ADfico:+M%3%A9todos+e+t%3%A9nicas+da+pesquisa+e+do+trabalho+acad%3%AAmico.+Novo+Hamburgo,+RS:+Feevale.&ots=dc108fwcCO&sig=mOliuoU01c5gcPevEfdbrnJRVco#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=zUDsAQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA13&dq=Prodanov,+Cleber+C.,+Freitas,+Ernani+C.+de.+2009.+Metodologia+do+trabalho+cient%3%ADfico:+M%3%A9todos+e+t%3%A9nicas+da+pesquisa+e+do+trabalho+acad%3%AAmico.+Novo+Hamburgo,+RS:+Feevale.&ots=dc108fwcCO&sig=mOliuoU01c5gcPevEfdbrnJRVco#v=onepage&q&f=false)

Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). "A Categorical framework of manufacturing for Industry 4.0 and beyond", *Procedia CIRP*, 52: 173-178, doi:org/10.1016/j.procir.2016.08.005

Rockwell Automation. (2014). "The connected enterprise maturity model retrieved april 2018 from Rockwell Automation", http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/cie-wp002_-en-p.pdf

Rother, M., & Shook, J. (1998). “Learning to see: value stream mapping to add value and eliminate muda.” Massachusetts (USA): The Lean Enterprise Institute. <https://books.google.com.br/books?id=mrNIH6Oo87wC&lpg=PP2&ots=24itc78IMB&lr&hl=pt-BR&pg=PP2#v=onepage&q&f=false>

Scher, A. W., & Hoffmann, M. (2015). “The process of business management”. In: vom Brocke, J. Rosemann, M. (eds) Handbook on business process management 2. *International of Information Systems*. Springer, Berli, Heidelberg. doi:org/10.1007/978-3-642-45103-4_5

Schuh, G. A., Gausemeier, R., Hompel, M., & Wahlster, W. (2018). “Industrie 4.0 maturity index. Retrieved April 2018 from 2017”, http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Projektberichte/acatech_STUDIE_Maturity_Index_eng_WEB.pdf

Schumacher, A., Erol, S., & Sihm, W. (2016). “A maturity model for assessing Industry 4.0 Readiness and maturity of manufacturing enterprises”, *Procedia CIRP*, 52: 161-166, doi:org/10.1016/j.procir.2016.07.040

Schwab, K., (2017). “The Fourth Industrial Revolution”, first ed. World Economic Forum. [https://books.google.com.br/books?id=ST_FDAAAQBAJ&lpg=PR7&ots=DUIv4RuCYS&dq=Schwab%2C%20K.%2C%20\(2017\).%20The%20Fourth%20Industrial%20Revolution%2C%20first%20ed.%20World%20Economic%20Forum&lr&hl=pt-BR&pg=PP1#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=ST_FDAAAQBAJ&lpg=PR7&ots=DUIv4RuCYS&dq=Schwab%2C%20K.%2C%20(2017).%20The%20Fourth%20Industrial%20Revolution%2C%20first%20ed.%20World%20Economic%20Forum&lr&hl=pt-BR&pg=PP1#v=onepage&q&f=false)

Scremin, L., Fabiano A., Alessandro B., & Solar-Pelletier, L., & Beaudry, C. (2018). “Towards a framework for assessing the maturity of manufacturing companies in Industry 4.0 adoption”. In R. Brunet-Thornton, & F. Martinez (Ed.), *Analyzing the Impacts of Industry 4.0 in Modern Business Environments*, IGI Global, 224-254, doi:org/10.4018/978-1-5225-3468-6.ch012

Shojaeinasab, A., Charter, T., Jalayer, M., Khadivi, M., Ogunfowora, O., Raiyani, N., ... & Najjaran, H. (2022). Intelligent manufacturing execution systems: A systematic review. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 503-522, doi:org/10.1016/j.jmsy.2022.01.004

Son, B. G., Kim, H., Hur, D., & Subramanian, N. (2021). The dark side of supply chain digitalisation: supplier-perceived digital capability asymmetry, buyer opportunism and governance. *International Journal of Operations & Production Management*, 41(7), 1220-1247, doi:org/10.1108/IJOPM-10-2020-0711

Son, Byung-Gak, Hyojin Kim, Daesik Hur, and Nachiappan Subramanian. 2021. “The dark side of supply chain digitalization: Supplier-perceived digital capability asymmetry, buyer opportunism and governance”, *International Journal of Operations & Production Management*, 41(7): 1220-1247. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-10-2020-0711>

Tabim, V. M., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2021). Implementing vertical integration in the industry 4.0 journey: Which factors influence the process of information systems adoption?. *Information Systems Frontiers*, 1-18, doi:org/10.1007/s10796-021-10220-x

Tortorella, G. L., Vergara, A. M. C., Garza-Reyes, J. A., & Sawhney, R. (2020). Organizational learning paths based upon industry 4.0 adoption: An empirical study with Brazilian

manufacturers. *International Journal of Production Economics*, 219, 284-294, doi:org/10.1016/j.ijpe.2019.06.023

Voss, C., Tsirikyisis, N., & Frohlich, M. (2002). "Case research in operations management", *International Journal of Operations & Production Management*, 22(2): 195-219, doi:org/10.1108/01443570210414329

Wei, Z., Song, M., & Wang, D. (2017). "Manufacturing flexibility, business model design, and firm performance", *International Journal of Production Economics*, 193: 87-97, doi:org/10.1016/j.ijpe.2017.07.004

Weyer, S., Schmitt, M., Ohmer, M., & Gorecky, D. (2015). "Towards Industry 4.0 - Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems", *IFAC-PapersOnLine*, 48(3): 579-584, doi:org/10.1016/j.ifacol.2015.06.143

Winkelhaus, S., & Grosse, E. H. (2020). "Logistics 4.0: A systematic review towards a new logistics system", *International Journal of Production Research*, 58(1): 18-43, doi:org/10.1080/00207543.2019.1612964

Womack, J., & Jones, D. (2011). "Seeing the whole value stream". Lean enterprise institute. https://books.google.com.br/books?id=llLhQ93jKyYC&lpg=PR1&ots=vddw_UL-Cs&lr&hl=pt-BR&pg=PR1#v=onepage&q&f=false

Zheng, T., Ardolino, M., Bacchetti, ., & Perona, M. (2020). "The applications of Industry 4.0 technologies in manufacturing context: a systematic literature review", *International Journal of Production Research*, 59(6): 1922-1954, doi:org/10.1080/00207543.2020.1824085

2.7 Anexo A

Modelos analisados por Mittal et al. (2018)

| Modelos | Requisitos Analisados | | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------|----|----|----|----|----|----|
| | FN | DR | PT | CO | PE | PF | CL |
| 1 (Qin et al., 2016) | | P | | | | | |
| 2 (Schumacher et al., 2016) | | P | P | P | P | | |
| 3 (Kannan et al., 2017) | | | P | | | | P |
| 4 (Weyer et al., 2015) | | P | | | P | | |
| 5 (Jung et al., 2016) | | P | | P | | | |
| 6 (Kipper et al., 2016) | A | A | | P | A | | |
| 7 (Lichtblau et al., 2018) | | P | | P | P | | |
| 8 (Geissbauer et al., 2018) | | P | | P | P | | P |
| 9 (Rockwell Automation, 2014) | | P | | | | | P |
| 10 (Anderl et al., 2015) | A | A | | | A | | |
| 11 (Lee et al., 2017) | | P | | P | P | | P |

| | | | | | |
|-----------|------------------------|---|---|---|---|
| 12 | (Schuh et al., 2018) | P | P | P | P |
| 13 | (Gökalp et al., 2017) | | P | P | A |
| 14 | (Akdil et al., 2018) | | P | A | |
| 15 | (Scremin et al., 2018) | | P | | A |

Legenda: (FN) Financeiros, (DR) Disponibilidade de recursos técnicos, (PT) Padrões de trabalho, (CO) Cultura organizacional, (PE) Produtos especializados, (PF) Participação dos funcionários e (CL) Alianças e colaboração

3. ARTIGO 2 – GESTÃO DE PROJETOS DE IMPLANTAÇÃO DE INDÚSTRIA 4.0: ROADMAPS PARA AS QUATRO DIMENSÕES SMARTS

Leandro Kappes
Néstor Fabian Ayala

Resumo

No ambiente corporativo, apesar de ser fundamental, nem sempre é o suficiente se adaptar as mudanças. Para fazer a diferença em determinados contextos, é preciso ser o protagonista da mudança, e para tanto, é imprescindível uma estrutura de governança consolidada. Entretanto, muitas organizações ou não dispõem desta estrutura, ou a mesma ainda é incipiente, e isto impacta em todas as ações e projetos da empresa. Sendo assim, visando auxiliar as empresas que desejam se inserir no novo contexto industrial que se apresenta, este artigo propõe um *roadmap* de gestão de projeto de implantação de Indústria 4.0 (I4.0). O *roadmap* proposto divide a complexidade dos projetos de implantação de novas tecnologias em sete questões norteadoras: cinco fundamentadas na Teoria das Restrições de Cox III e Jr. (2013), e mais duas que foram introduzidas como contribuição deste estudo. As questões norteadoras do *roadmap* proposto consideram as quatro dimensões de tecnologias *front-end* apresentadas por Frank et al. (2019), assim, é possível criar um *roadmap* para cada uma das dimensões. Os resultados da pesquisa apontam que as práticas de gestão adotadas não foram suficientes para atender as necessidades de cada projeto de implantação. Desta forma, fomentar a aplicação de boas práticas de gestão na adoção de soluções tecnológicas, pode contribuir de forma estruturada, robusta e, simultaneamente flexível, para cada contexto, para uma maior assertividade na implementação de projetos de soluções tecnológicas.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Gestão de Projetos; Modelos de Maturidade; Modelos de Prontidão; Roteiro de Implantação.

Abstract

In the corporate environment, despite being fundamental, it is not always enough to adapt to changes. To make a difference in certain contexts, it is necessary to be the protagonist of change, and for that, it is necessary to be in a consolidated governance structure. However, many organizations are either not monitored by this structure, or it is still incipient, and this impacts on all the company's actions and projects. Therefore, in order to help companies that wish to enter the new industrial context that presents itself, this article proposes a project management script for the implementation of Industry 4.0 (I4.0). The proposed script divides the complexity of new technology deployment projects into seven guiding questions: five based on the Theory of Constraints by Cox III and Jr. (2013), and two more that were motivated as a contribution to this study. The guiding questions of the proposed roadmap take into account the four dimensions of front-end technologies designed by Frank et al. (2019), thus, it is possible to create a script for each of the dimensions. The survey results indicate that the management

practices adopted were not sufficient to meet the needs of each implementation project. In this way, encouraging the application of good management practices in the adoption of technological solutions can contribute in a structured, robust, and simultaneously flexible way for each context, for greater assertiveness in the implementation of projects of technological solutions.

Keywords: Industry 4.0; Project Management; Maturity Models; Readiness Models; Deployment Roadmap.

3.1 Introdução

A transformação digital das empresas é entendida como o processo de transição, no qual a empresa passa dos modelos anteriores de industrialização, para se tornar uma empresa interconectada (Frank et al., 2019b). Assim, o novo modelo industrial resultante, foi chamado Indústria 4.0, e tem como diretrizes básicas conectar produtos, máquinas e pessoas ao meio ambiente combinando produção, tecnologia da informação e internet (Kagermann, Wahlster e Helbig 2013). Sendo assim, a capacidade de inovação é um dos principais fatores organizacionais que impactam no sucesso da adoção de soluções tecnológicas (Tabim, Ayala e Frank 2021). Para contribuir, acerca do entendimento do assunto, Frank, Delanogare e Ayala (2019a), desenvolveram um estudo, no qual os autores classificaram as tecnologias em duas camadas, as tecnologias de base e as tecnologias *front-end*, sendo que as últimas representam as quatro dimensões *Smart* de acesso a I4.0.

Analisando a complexidade da gestão de implantação de soluções tecnológicas, em pesquisa realizada pelo Conselho Nacional da Indústria (CNI 2020) com 509 empresas, aponta que, mais de 50% das empresas pesquisadas, não conseguem nem mesmo acompanhar o ritmo de desenvolvimento de novas tecnologias disponibilizadas ao mercado. A pesquisa levanta ainda, outros entraves na hora de decidir pela implementação da I4.0, nos quais as pequenas e médias empresas (PMEs) têm maior dificuldade, pois em sua grande maioria possuem modelos de negócio e sistemas produtivos incipientes, o que torna o contexto de implementação, ainda mais complexo (Mittal et al., 2018; Ghobakhloo e Iranmanesh 2021). Diante dos fatos e contexto apresentado, este estudo, tem por objetivo responder: Quais seriam os aspectos a serem observados na gestão de um projeto de implementação de Indústria 4.0, considerando as quatro dimensões *Smarts*?

Para responder a esta pergunta, este estudo será fundamentado no processo de pensamento da TOC (Cox III e Jr. 2013), pois assim é possível definir todo o projeto de forma

estruturada. Também será necessário: caracterizar a I4.0, bem como as quatro dimensões de tecnologias *front-end* e analisar os modelos de implementação de I4.0 existentes. Posteriormente será apresentado um *roadmap* passível de customização, que pode ser aplicado a cada uma das quatro dimensões *Smart*.

3.2 Fundamentos teóricos

3.2.1 As quatro dimensões *Smart* da I4.0

A quarta revolução industrial, mais conhecida por I4.0, surgiu de uma estratégia do governo da Alemanha em 2011, envolvendo a iniciativa privada e universidades, visando fomentar a produtividade da indústria nacional para o desenvolvimento de sistemas avançados de produção (Hofmann e Rüschi 2017). Neste novo contexto industrial, com o objetivo de facilitar a compreensão e seleção das soluções tecnológicas disponíveis, Frank, Delanogare e Ayala (2019a) propõem que sejam classificadas em duas camadas: tecnologias de base e tecnologias *front-end*. As tecnologias *front-end* (Quadro 3.1), foram estruturadas em quatro dimensões inteligentes, que estão relacionadas as necessidades operacionais e de mercado (Frank, Delanogare e Ayala 2019a).

Quadro 3.1 - Tecnologias da I4.0 nas quatro dimensões *Smart*. Adaptado de Frank, Delanogare e Ayala (2019a)

| Dimensão <i>Smart</i> | Foco | Tecnologias |
|--|---|---|
| Smart Manufacturing | Integração Vertical | Sensores, atuadores e PLCs |
| | | <i>Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)</i> |
| | | <i>Manufacturing Execution System (MES)</i> |
| | | <i>Enterprise Resource Planning (ERP)</i> |
| | Virtualização | Comissionamento virtual |
| | | Inteligência artificial para manutenção (AI) |
| | | (AI) e <i>Advanced Planning and Scheduling – (APS)</i> para o PCP |
| | Automação | <i>Machine-to-Machine Communication (M2M)</i> |
| | | Robôs industriais (Robôs, Cobots, AVG, AMR...) |
| | | Identificação automática de não-conformidades |
| | Traçabilidade | Identificação e traçabilidade de matéria-prima |
| | | Identificação e traçabilidade de produtos e componentes |
| | Flexibilidade | Manufatura aditiva |
| Linhas autônomas e flexíveis | | |
| Gerenciamento de Energia | Monitoramento e melhoria da eficiência energética | |
| Smart Products & Service System | Controle das funções | Conectividade dos produtos |
| | | Controle dos produtos |
| | Melhorar experiência de uso | Otimização dos produtos |
| | | Autonomia dos produtos |

| | | |
|----------------------------------|------------------------------------|--|
| <i>Smart Supply Chain</i> | Tomada de decisões em tempo real | Plataformas digitais com fornecedores |
| | | Plataformas digitais com clientes |
| | | Plataformas digitais entre unidades da empresa |
| <i>Smart Working</i> | Otimizar desempenho | Monitoramento remoto da produção |
| | | Operação remota da produção |
| | | Robôs colaborativos |
| | Simplificação de tarefas | Realidade aumentada para manutenção |
| | | Realidade aumentada e virtual para o desenvolvimento de produtos |
| Aprendizado de novas tecnologias | Realidade virtual para treinamento | |

As segunda camada de tecnologias, denominadas de tecnologias de base, a saber: *Cloud Computing*, *Internet of Things*, *Big Data* e *Data Analytics*, devem suportar as tecnologias *front-end*. Estas tecnologias são consideradas básicas por estarem presentes em todas as dimensões *front-end* e por impulsionarem as dimensões da I4.0 utilizando interconectividade e inteligência ao novo sistema de manufatura (Frank, Delanogare e Ayala 2019a). A integração decorrente entre as tecnologias de base e as máquinas em *Cyber-Physical Systems* (CPS) é o que caracteriza este novo estágio industrial (Kagermann, Wahlster e Helbig 2013; Schwab 2017).

3.2.1.1 A *Smart Manufacturing* na I4.0

As tecnologias aplicadas à *Smart Manufacturing* se desenvolveram, a partir de sistemas de produção avançados (Dalenogare et al., 2018; Yin et al., 2018) e são a base tecnológica para o desenvolvimento da I4.0 (Bueno et al., 2020; Culot et al., 2020; Kipper et al., 2020). Nesse contexto, a *Smart Manufacturing* é o primeiro objetivo da I4.0, pois compreende as tecnologias necessárias para o processamento do produto no sistema de produção (Frank, Delanogare e Ayala 2019a), no qual é possível identificar duas camadas distintas, os equipamentos de fabricação com sua própria inteligência, a *Internet of Things* que realiza a interface com a segunda camada cibernética composta pela *Cloud Computing*, *Big Data* e *Data Analytic* (KUSIAK, 2018). Dessa forma, o estudo de Frank, Delanogare e Ayala (2019a) classifica as tecnologias aplicadas a *Smart Manufacturing* em seis dimensões, conforme apresentado no Quadro 3.1.

A integração vertical, diz respeito à integração de sistemas em diferentes níveis hierárquicos de uma organização, que vão desde a produção, até os níveis superiores das equipes de gestão, visando apoiar a tomada de decisão (Dalenogare et al., 2018). A maioria da literatura sobre o assunto, ou menciona a integração vertical como interações entre sistemas, ou referencia como um conceito geral. Estudo recente, evidenciou vinte e dois fatores em três fases

na tomada de decisão (conhecimento, persuasão e decisão final), dentre os quais destaca-se a importância de envolver a alta administração na decisão de adotar ou rejeitar a implementação, mesmo que a análise em etapas anteriores tenha se concentrado nos níveis organizacionais mais baixos (Tabim et al., 2021). As demais dimensões de tecnologias *Smart Manufacturing* são aplicadas, conforme a definição dos objetivos estratégicos da empresa, alinhados ao nível de maturidade alcançado no modelo Acatech (Schuh et al., 2017) de maturidade de implementação, sendo que estas tecnologias são complementares e não substituíveis, enquanto as empresas estão crescendo em maturidade (Frank, Delanogare e Ayala 2019a).

3.2.1.2 O *Smart Product & Service System* na I4.0

Se para o segmento industrial a *Smart Manufacturing* é um objetivo, os *Smart Product & Service System* são sua extensão (Frank, Delanogare e Ayala 2019a). Os produtos são efetivamente *Smart*, quando agregam valor externo integrando dados e informações do cliente ao sistema de produção (Dalenogare et al., 2018). O sensoriamento de produtos, permite que se obtenha: conectividade, monitoramento, controle, otimização e autonomia do produto. Em produtos conectados, que se utilizem de serviços em nuvem é possível acompanhar suas condições de uso, assim como acessar a operação remotamente. Isto é possível com a utilização da inteligência artificial, os algoritmos analíticos são capazes de otimizar o desempenho do produto de forma autônoma, por meio de diagnósticos preditivos, assim como fornecer dados e informações ao fabricante do produto, que permitam realizar a manutenção preventiva e projetar novos produtos mais eficientes (Frank, Delanogare e Ayala 2019a). Os *Smart Product & Service System* permitem a integração com sistemas de serviço de produto digital (SSP), onde o fabricante pode oferecer serviços adicionais junto ao produto. Esta nova estratégia de servitização pode reestruturar o modelo de negócio, ampliando as possibilidades de geração de receitas (Ayala et al., 2017; Frank et al., 2019b). Apesar dos *Smart Product & Service System* e *Smart Manufacturing* serem passíveis de serem implementados separadamente, conforme o conceito de I4.0, pressupõem que estejam conectados e integrados (Kagermann, Wahlster e Helbig 2013).

3.2.1.3 A *Smart Supply Chain* na I4.0

As *Smart Supply Chains*, possuem como tecnologias básicas plataformas digitais, nas quais conectam fornecedores, clientes e outras unidades da empresa com o objetivo de

proporcionar eficiência complementar às atividades operacionais (Frank, Delanogare e Ayala 2019a). Visando propor uma estrutura otimizada, (Frederico et al., 2020), definem quatro categorias de construtos necessários a *Supply Chain 4.0*: I – Gerentes e apoiadores de capacidade, que realizam a gestão e fornecem suporte ao sistema; II – Alavancas de tecnologia, onde foram identificadas 21 tecnologias aplicadas em *Supply Chain 4.0* com destaque para a *IoT*, *Ciber-Security*, *Blockchain* e *Big Data Analytic*; III – Requisitos de desempenho de processo como interoperabilidade, integração, colaboração, transparência, capacidade de resposta, flexibilidade, otimização de processo, eficiência e medição de desempenho e IV – Resultados estratégicos, em que o foco no cliente, fornecedor, eficiência e custos são preponderantes. No ambiente de fábrica as tecnologias da *Smart Supply Chain* auxiliam na rastreabilidade interna de materiais e produtos, assim como, em sua movimentação com veículos autônomos (Zhou et al., 2017). Já no ambiente externo apoiam a integração com fornecedores, trocando informações em tempo real, pois favorecem a redução de custos operacionais e prazos de entrega e, assim facilitam o acesso sob demanda às informações exibidas em nuvem (Pfohl et al., 2017; Marodin et al., 2016).

3.2.1.4 O *Smart Working* na I4.0

A última dimensão de tecnologias *front-end*, o *Smart Working*, assim como a *Smart Supply Chain* deve suportar as demais dimensões de tecnologias *Smart* (Meindl et al., 2021). As tecnologias aplicadas ao *Smart Working*, tem por objetivo, proporcionar melhores condições aos trabalhadores com recursos habilitados em tecnologia, visando aumentar a sua produtividade e flexibilidade, para atender aos requisitos do sistema de manufatura (Kagermann et al., 2013; Romero et al., 2016; Stock et al., 2018), assim como fornecer acesso remoto às informações do chão de fábrica (Wang et al., 2016).

Estudo recente identificou oito diferentes atividades de fabricação, onde o *Smart Working* pode contribuir, são elas: montagem, operação de máquinas, manutenção, treinamento, controle de qualidade, movimentação de materiais, projeto de processo e produto, planejamento e controle de produção. O estudo apresenta ainda, as quinze tecnologias que contribuem direta ou indiretamente para as atividades dos trabalhadores: realidade aumentada, robôs colaborativos, realidade virtual, dispositivos vestíveis, sensores de ambiente e máquinas, automação de tarefas, assistente habilitado por voz, gêmeo digital, sistemas inteligentes de apoio à decisão, veículos guiados automatizados e autônomos, visão computacional, redes sociais industriais, exoesqueletos, análise visual e inteligência artificial (Dornelles et al., 2021).

As tecnologias aplicadas ao *Smart Working* podem ser consideradas um incremento ao conceito de Operador 4.0 (Romero et al., 2016) e alinhadas com um novo conceito emergente da Indústria 5.0, onde a manufatura está centrada no ser humano (Breque et al., 2021). Isto reforça o aspecto sociotécnico desta dimensão, em que humanos e máquinas são considerados no conceito da I4.0 como um mecanismo integrado (Thoben et al., 2017), pois se a perspectiva do Operador 4.0 está centrada na capacidade da força de trabalho, a dimensão do *Smart Working* tem uma visão holística dos processos de trabalho e de como as tarefas são executadas na fabricação (Frank, Delanogare e Ayala 2019a; Meindl et al., 2021).

3.2.2 Análise dos modelos de implantação de I4.0

Dentre os modelos de avaliação aplicados a I4.0, os modelos de maturidade surgiram sob a égide da gestão da qualidade na década de 1930 (Shewhart, 1931), os quais eram utilizados para descrever o nível de desenvolvimento de qualquer entidade, desde seres humanos até organizações. Neste sentido, a transformação digital consiste em uma jornada evolutiva, na qual são avaliados os estágios de evolução, segundo critérios cumulativos previamente definidos (Kagermann, Wahlster e Helbig 2013). Estas avaliações, tem por objetivo apoiar as empresas no processo de transformação digital, e atualmente, dispõe de diversos modelos estruturados, por meio de questionários padronizados (Colli et al., 2019).

O modelo de maturidade Acatech é um dos mais conhecidos, proposto por Schuh et al. (2017), representa uma visão holística do processo de evolução rumo a jornada 4.0, porém sua aplicação prática apresenta várias lacunas, ainda, não consideradas. Dentre as lacunas que podem ser observadas, destacam-se: foco do processo de implantação atribuído essencialmente nas tecnologias; pressupõe que as empresas já tenham atingido 100% de maturidade nas tecnologias atribuídas as revoluções industriais anteriores; avaliação de maturidade generalista com pouca flexibilidade, para adequar-se aos múltiplos contextos possíveis; não avalia a capacidade de prontidão da empresa, assim como não orienta, quanto a definição de tecnologias, definição de diretrizes, rumo a transformação digital e processo de autoavaliação, durante a jornada de implantação. Os autores Ganzarain e Errasti (2020) – propõem um *roadmap* em três estágios: criar visão personalizada, definir roteiro e requisitos, e definir portfólio do projeto personalizado. O modelo foca na concepção estratégica do projeto, no qual cita elementos importantes, como a definição de escopo de projeto, tecnologias e requisitos, mas não orienta como obter estas definições. O *roadmap* é generalista e simples, principalmente por se propor

a atender as singularidades das PMEs, nas quais o número de variáveis e complexidade no processo de implantação é ainda maior (Mittal et al., 2018). Já Lu e Weng (2018) desenvolveram um *roadmap* específico, para analisar os atributos e maturidade em dezenove tecnologias aplicadas a manufatura, no qual a pesquisa foi bem conduzida, mas o *roadmap* é complexo e não aborda os aspectos que antecedem a definição de tecnologias, assim como os aspectos posteriores a esta definição. Um modelo de rede intermediada foi apresentado por Lee et al. (2010), em que a abordagem está centrada na concepção de ecossistemas para fomentar e fortalecer a I4.0 entre as PMEs, porém esta abordagem carece de elementos que subsidiem o processo de definição, análise, implantação e autoavaliação de todo o processo de transformação digital.

No conceito de I4.0 a manufatura é a preocupação recorrente nesta nova etapa industrial (Frank, Delanogare e Ayala 2019a). Neste sentido, Rockwell Automation (2014) desenvolveu um *roadmap* em cinco estágios, no qual a abordagem se volta, para a infraestrutura de TI e tecnologias operacionais, sustentada pelo controle e gestão de dados. Trata-se uma abordagem generalista e básica, se considerado o porte da empresa e específica, quando analisada a área de aplicação, assim como carece de fornecer subsídios, para orientar na “[...] identificação de lacunas e fraquezas na rede e nas operações [...]”, para promover “[...] expansões de instalações e novas tecnologias”. O desenvolvimento sustentável de produtos e da empresa é o foco do *roadmap* apresentado por Ching et al (2022). Os autores propõem um *roadmap* de contribuições, para a fabricação sustentável com quinze funções inter-relacionadas, dispostas em um mapa conceitual generalista e complexo. Já a indústria de mineração pesada Sul-Africana, foi o objeto de pesquisa de Prinsloo, Vosloo e Mathews (2018), com o objetivo de apresentar um *roadmap* de implementação de I4.0. Os autores elencam quatro aspectos a serem analisados: os principais atributos das tecnologias, as tecnologias e alavancas tecnológicas e, por fim os impulsos de valor. A pesquisa se caracteriza por produzir um *roadmap* específico para um segmento, baseado em tecnologia e com uma análise superficial.

Mapear uma estratégia para Indústria 4.0, criar pilotos, definir recursos, gerir dados e pensar em ecossistemas de transformação digital e inovação, são os aspectos considerados no *roadmap* proposto por Geissbauer, Vedso e Schrauf (2016). Este é o *roadmap* com a maior cobertura de atributos significativos para a I4.0 observados nesta revisão, contudo sua análise é superficial e pouco pragmática. Um *roadmap* específico, obtido pelo cruzamento entre três níveis de inteligência e três níveis de automação foi apresentado por Qin, Liu e Grosvenor (2016). Contudo, mesmo considerando, apenas duas variáveis, os autores caracterizaram ambas superficialmente. Schumacher, Erol e Sihnpresentado (2016) propõem um modelo de maturidade

que contempla um total de 62 itens agrupados em nove dimensões da empresa. Trata-se de uma abordagem abrangente, mas sem detalhamento do processo de implementação do modelo, o que o deixa rudimentar. O modelo de maturidade Acatech, proposto por Schuh et al. (2017), foi modificado por Colli et al. (2019). Os autores incluíram um nível zero de digitalização, conforme lacuna identificada por Mittal et al. (2018) e redistribuíram os elementos do modelo Acatech, entre os cinco níveis de maturidade restantes. No que concerne as dimensões avaliadas, a saber: governança, tecnologia, conectividade e competências necessárias para o processo de transformação digital, foi acrescentada a dimensão criação de valor. A ideia central é interessante, pois apresenta uma evolução do modelo Acatech, mas, assim como este, carece de mais detalhes de o que implementar e, principalmente, como implementar as mudanças necessárias para a evolução nos níveis. Um modelo conceitual centrado na automação, foi proposto por Scheer (2015), no qual o autor apresenta uma estrutura em três dimensões: a fabricação, como a base do sistema e, logo acima, a cadeia de suprimentos e o desenvolvimento de produtos. O autor afirma não ser possível definir um roteiro estratégico mestre para a I4.0 e, sendo assim, não aponta caminhos a serem considerados.

Quadro 3.2 - Modelos de avaliação analisados

| Autores | Abordagem | Flexibilidade: generalista, específico ou adaptável | Resultado esperado |
|---|---|--|--|
| Lee et al. (2010) | Ecosistema orientado para PMEs | Generalista | Tem como expectativa a união de forças para facilitar a adoção das novas tecnologias emergentes. |
| Rockwell Automation (2014) | Requisitos e gestão da informação na manufatura | Generalista | Indica atividades de forma generalizada que permitem a evolução do estágio de maturidade (01 ao 05), focado em colaboração, proteção e atualização de redes e controles, definição e organização de dados. |
| Scheer (2015) | Foco na tecnologia aplicada na automação | Generalista | O autor fornece um modelo conceitual centrado em 03 dimensões que devem orientar a implementação. |
| Geissbauer, Vedso e Schrauf (2016) | Foco da estratégia de implantação | Generalista | Sinaliza atividades para a transição do estágio de maturidade, mapeando a estratégia de implantação, sugerindo pilotos, definição de recursos, análise de dados, digitalização da empresa e pensamento de ecossistema. |
| Qin, Liu e Grosvenor (2016) | Tecnologias aplicadas em processos de automação | Generalista | Prescreve requisitos para a evolução de estágio. |
| Schumacher, Erol e Sihm (2016) | Nível de maturidade | Generalista | Indica padrões de maturidade prescritos em nove elementos a serem avaliados |

| | | | |
|---|--|--|--|
| Acatech - Schuh et al. (2017) | Tecnologias aplicada em níveis de maturidade | Generalista | Pressupõe o atendimento de níveis de maturidade (01 e 02) para ingressar na Indústria 4.0 (03 a 06), mas não indicações e ações que permitam a transição do estágio de maturidade. |
| Lu e Weng (2018) | Tecnologias para manufatura | Específica nos atributos de maturidade de 19 tecnologias | Prescreve caminhos diferentes no mesmo <i>roadmap</i> visando a implantação de três grupos de tecnologias distintas. |
| Prinsloo, Vosloo e Mathews (2018), | Tecnologias para manufatura | Específica e superficial | Analisa quatro elementos para determinar quais tecnologias são aplicáveis ao setor de mineração. |
| (Colli et al., 2019) | Nível de maturidade | Generalista | Descreve modelo desenvolvido, a partir do modelo Acatech com estrutura em seis níveis de maturidade e cinco dimensões a serem avaliadas, para a mudança de nível. |
| Ganzarain e Errasti (2020) | Estratégia do projeto | Generalista, ignora singularidade das empresas | Parte da premissa que empresas dominam o conhecimento inerente ao assunto, e possam estruturar a implementação. |
| Ching et al. (2022) | Sustentabilidade do negócio | Generalista | Atribui 15 funções inter-relacionadas a serem almeçadas visando alcançar a sustentabilidade. |

3.2.3 Estruturando um roadmap de implantação de I4.0

Desenvolvido por Goldratt (1990) e aprimorado por Cox III e Schleier Jr. (2013), o processo de pensamento da Teoria das Restrições (TOC), propõe cinco questionamentos a serem considerados, visando propor uma forma estruturada de pensar de modo que objetivos, restrições, planejamento, ações e avaliações sejam considerados, durante a análise de qualquer evento. Estes passos, consiste em uma análise sistêmica e holística do evento desejado, de modo a promover uma reflexão ao nível estratégico, tático e operacional, cujos questionamentos são:

- Por que mudar: definir objetivos e metas claras;
- O que mudar: identificar as restrições;
- Para o que mudar: definir a melhor solução;
- Como causar a mudança: planejar a ação e executar;
- Como medir e manter a mudança: avaliar processo de implantação continuamente.

A aplicação do processo de pensamento da Teoria das Restrições tem origem na amplitude de aplicações de suas ferramentas de raciocínio aos mais diferentes problemas, na qual, para cada situação-problema analisada, um reduzido conjunto de causas ajudam a tratar com simplicidade as questões inerentes a qualquer sistema completo. O processo de pensamento é estruturado com ferramentas que podem ajudar a reduzir a resistência à mudança

nas organizações, uma vez que estas direcionam as diferentes perspectivas a um foco comum: a restrição. Durante a análise e tratamento da situação-problema, é possível integrar a Teoria das Restrições com métodos, técnicas e ferramentas adotadas no âmbito do Sistema Toyota de Produção, Seis Sigma, Manutenção Produtiva Total (TPM), *Business Process Management* entre outras.

Dado que os modelos apresentados anteriormente (Quadro 3.2), não apresentam uma estrutura flexível, para atender empresas em contextos distintos, no entanto a TOC possibilita organizar claramente o passo a passo de uma jornada da I4.0, uma vez que considera as principais perspectivas aplicadas na implantação de novos projetos.

3.3 Método de pesquisa

Este estudo foi realizado, por meio de uma abordagem empírica, na qual a coleta e a análise qualitativa dos dados foi estruturada, utilizando múltiplas entrevistas. A aplicação da pesquisa qualitativa com múltiplas entrevistas é utilizada quando se deseja compreender a complexidade do objeto de pesquisa e ser capaz de situá-lo no contexto de suas práticas socioculturais que, por sua vez, configuram determinadas atividades (MIGUEL, 2010). Por meio desta abordagem, é possível chegar a conclusões generalizáveis, reduzindo o viés do observador e aumentando a validade externa, em que os dados são tratados de modo a eliminar interpretações alternativas (YIN 2009). Todo o planejamento e estruturação da pesquisa, foi baseado em Voss, Tsirikyisis e Frohlich (2002), com orientações descritas a seguir.

3.3.1 Seleção dos casos

A seleção dos casos aconteceu, mediante uma amostragem teórica, na qual, segundo Eisenhardt e Graebner (2007), tal amostragem, contribui, lançando luz, acerca dos construtos, para os casos selecionados. O primeiro passo foi identificar as empresas, que já tivessem iniciando a jornada de transformação digital rumo a I4.0. O segundo passo, consistiu em examinar o perfil das empresas e agrupar os respondentes (Voss, Tsirikyisis e Frohlich 2002) nas quatro dimensões de aplicação de tecnologias, propostas por Frank, Delanogare e Ayala (2019a). Concluída a etapa anterior, ficou evidente que as empresas possuem maior adesão a dimensão de *Smart Manufacturing*, o que conduziu a uma nova seleção de casos convidando

especialistas e fornecedores de soluções tecnológicas da I4.0, para complementar a amostragem nas quatro dimensões.

Dessa forma, foram escolhidas empresas de segmentos distintos, visando produzir resultados contrastantes, que possam oferecer uma visão mais ampla do fenômeno e facilitar a generalização dos resultados (Ceschin 2013; Yin 2009; Voss, Tsikrikysis e Frohlich 2002). A abertura da amostragem, incluindo especialistas e fornecedores foi importante, pois, além de contribuir como respondentes, com visões distintas, fato, que, também contribui para a validação e a possibilidade de generalização dos resultados (Voss, Tsikrikysis e Frohlich 2002), possibilitou analisar as dimensões *Smart*, ainda pouco conhecidas.

3.3.2 Instrumentos de pesquisa

O estudo foi conduzido, utilizando entrevistas semiestruturadas. No agendamento das entrevistas, os respondentes receberam por e-mail o protocolo de pesquisa e um formulário de consulta preliminar. O protocolo de pesquisa, aprimora a confiabilidade e a validade dos dados da pesquisa de entrevistas coletadas (MILES & HUBERMAN, 1994). e o formulário de consulta preliminar. No formulário de consulta preliminar, os respondentes informaram dados das empresas e profissionais, assim como questões que contextualizavam a participação dos mesmos no processo de transformação digital.

3.3.3 Coleta de dados

Os dados da consulta preliminar, foram obtidos, antecipadamente, por e-mail, o que facilitou para a preparação das entrevistas estruturadas, e também contribuiu para ampliar o contraste e melhorar a confiabilidade da análise (Yin 2009). Das nove entrevistas realizadas, cinco ocorreram por indicações de fornecedor de soluções tecnológicas, fato que permitiu coletar dados, acerca das empresas, junto a este fornecedor, antes mesmo das entrevistas, bem como, consultados como fontes complementares de dados os sites, relatórios com indicadores de desempenho, portfólio de produtos e documentos que complementassem a análise dos sistemas de governança das empresas, o que ampliou a triangulação de dados (Yin 2009).

Nesse caso, procurou-se entrevistar preferencialmente as pessoas, que foram responsáveis pelo processo decisório de adoção de soluções tecnológicas e, que participaram ou tinham

amplo conhecimento de todas as etapas do processo de implementação. Uma vez que os entrevistados, tinham domicílio em regiões e, até, em estados distintos, todas as entrevistas foram realizadas por vídeoconferência, gravadas com a autorização dos respondentes na devolutiva da consulta preliminar e posteriormente transcritas. As entrevistas tiveram uma duração média de 50 minutos realizadas por um único entrevistador. Todas as etapas do processo de coleta de dados, ocorreram entre os meses de março a junho de 2022.

3.3.4 Validade e confiabilidade

No que tange à confiabilidade e validade do construto, foram utilizadas múltiplas fontes de evidências, entrevistando profissionais com atuação em segmentos distintos, assim como especialistas, fornecedores de tecnologias e fontes secundárias de dados complementares (Voss, Tsirikyisis e Frohlich 2002). A utilização de fontes distintas de evidências, assegura a confiabilidade dos resultados, uma vez que passam a ter mais qualidade (Martins, 2006). A validação externa foi assegurada pela aplicação de múltiplas entrevistas. E, por fim, a confiabilidade foi garantida, utilizando um protocolo de estudo de entrevista e um resumo final, que foi elaborado com base na transcrição das entrevistas gravadas e observações. Alguns desses procedimentos foram descritos nas seções anteriores (3.3 a 3.3.4).

3.3.5 Análise dos dados

O primeiro passo para a análise dos dados foi transcrever os dados das gravações das entrevistas. O passo seguinte consistiu no cruzamento dos dados obtidos, com a análise dos dados dos formulários de consulta preliminar, o que possibilitou estabelecer uma nova matriz (Voss, Tsirikyisis e Frohlich 2002), visualizando o modelo de gestão de implantação utilizado, para cada empresa (Quadro 3.3), sob a ótica da Teoria das Restrições (Cox III e Schleier Jr. 2013), conforme proposto na Seção 3.2.3.

Cada caso foi analisado individualmente e de forma cruzada, de modo a identificar e categorizar fatores em comum, contrastes e padrões com os demais casos (Voss, Tsirikyisis e Frohlich 2002). As redundâncias e discrepâncias observadas, foram tabuladas, para a obtenção de resultados consistentes e passíveis de análise. Por fim, foi realizado um cotejo dos resultados da análise de casos cruzados com a literatura e desenvolvido um referencial teórico final.

3.4 Resultados e discussões

Os resultados da aplicação das entrevistas estruturadas, foram organizados no Quadro 3.3. Como estes resultados foram ordenados pretende identificar: como foi definida a equipe de implantação dos projetos de I4.0; o processo de validação de fornecedores, o nível e qualidade da comunicação, para suportar a integração de equipes distintas, o método de controle aplicado ao processo de integração das equipes, a definição clara do escopo de projeto e, se foram desenvolvidos ou não, testes de validação para a nova tecnologia indicada para o processo.

Quadro 3.3 - Resumo dos resultados encontrados na pesquisa 02

| Empresa / Dimensão Smart de aplicação | Definição de gestor e equipe de implantação | Prospecção e validação de fornecedores | Amplitude e qualidade da comunicação | Definição do escopo de projeto | Controle de integração das ações | Simulação e/ou Piloto |
|---|--|---|---|---|---|----------------------------------|
| Empresa A - Smart Manufacturing | Não | Não | Vertical e horizontal ineficientes. | Não | Não | Não |
| Empresa B - Smart Manufacturing | Não | Não | Vertical e horizontal ineficientes. | Não | Não | Implementou teste piloto. |
| Empresa C - Smart Manufacturing | Não | Indicação de tecnologia sem validação. | Vertical ok, horizontal ineficiente. | Não | Não | Não |
| Empresa D - Smart Manufacturing | Com gestor e equipe, mas sem controle integral do projeto. | Indicação de tecnologia sem validação. | Vertical ok, horizontal ineficiente. | Escopo definido. | Controle parcial. | Não |
| Empresa E - Smart Supply Chain | Com gestor e equipe definidos. | Recomendação de tecnologias, mas não de fornecedores. | Vertical ok, horizontal inexistente. | Sim, mas sem etapas claras. | Não se aplica. | Não se aplica. |
| Empresa F - Smart Supply Chain | Com gestor e equipe definidos. | Houve pesquisa e validação de fornecedores. | Vertical e horizontal, efetivas. | Escopo definido. | Controle estruturado. | Não |
| Empresa G - Smart Product & Service System | Sim, mas sem controle integral do projeto. | Desenvolvimento e validação próprios. | Horizontal ok, vertical Ineficiente. | Escopo definido. | Controle estruturado. | Implementou teste piloto. |
| Empresa H - Smart Working | Não | Indicação de tecnologia sem validação. | Vertical e horizontal, mas ineficiente. | Não | Não | Não |
| Empresa I- Smart Working | Com gestor e equipe definidos. | Indicação de tecnologia sem validação. | Vertical e horizontal, efetivas. | Sim, mas sem etapas claras. | Não se aplica. | Não se aplica. |

Analisando a tabulação dos resultados, é possível observar, que a maioria dos projetos de implantação de I4.0 não foram conduzidos de forma estruturada. Observa-se, tanto a ausência, como a deficiência de gestão em várias ações, o que fica, ainda, mais claro nos relatos dos entrevistados, pois ao ponderar sobre o assunto, os mesmos sinalizaram a ocorrência de ruídos de comunicação, assim como a necessidade de revisão e ajustes no escopo e cronograma de implantação, buscando alinhar aspectos não considerados inicialmente, dentre outras dificuldades. Visando propor uma alternativa aos modelos analisados, foi desenvolvida uma estrutura conceitual (Figura 3.1), orientada pelo processo de pensamento da TOC (Cox III e Schleier Jr. 2013), tópicos 1, 2, 3, 6 e 7, que correspondem aos elementos em branco na figura e, pelas quatro dimensões *Smart* de aplicações tecnológicas propostas por Frank, Delanogare e Ayala (2019a), representadas pelos elementos em azul no tópico 03. Os destaques elementos da *framework*, tópicos 04 e 05, compõem a contribuição deste estudo.

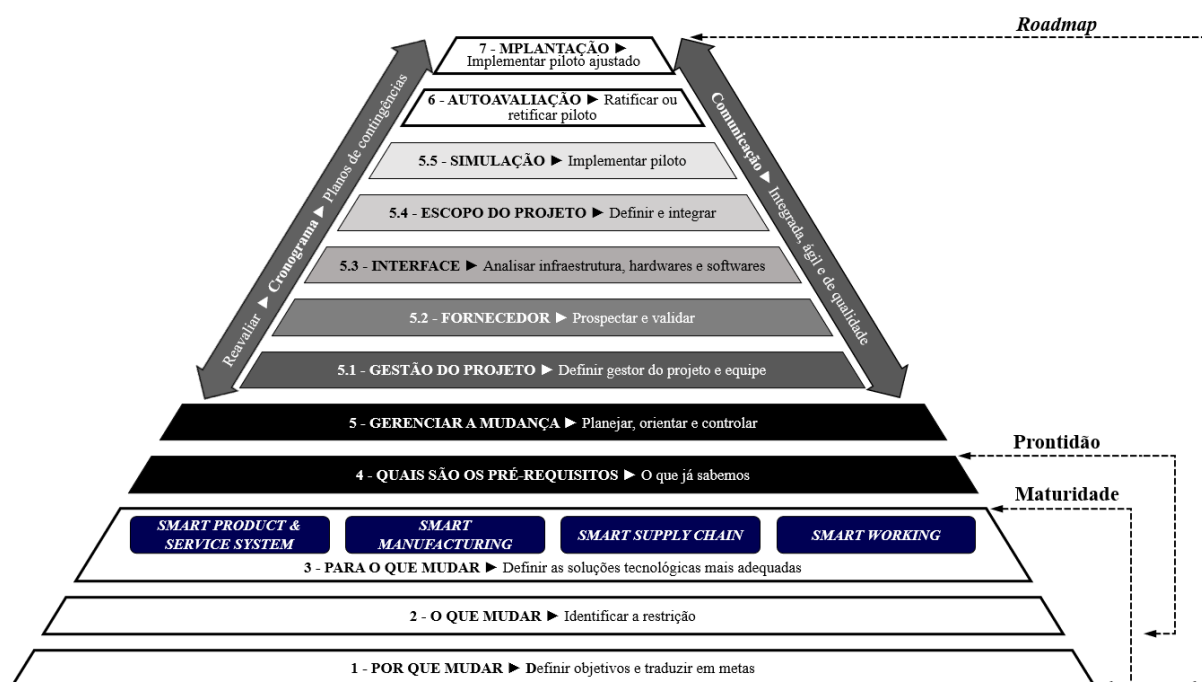


Figura 3.1 – Modelo conceitual de gestão de implantação de I4.0 proposto. Adaptado de Cox III e Schleier Jr (2013) e Frank, Delanogare e Ayala (2019a)

3.4.1 Por que, o que e para o que mudar

Definir claramente a motivação e o objetivo da mudança (Figura 3.1 – Tópicos 1, 2, e 3 da figura), são elementos fundamentais para validar o que realmente a empresa necessita, para atingir seus objetivos estratégicos (Ghobakhloo e Iranmanesh 2021), contudo, durante as entrevistas, ficou evidente que, em alguns casos estas definições se quer foram consideradas.

Um exemplo neste sentido, ocorreu com a Empresa A, que definiu a implantação da tecnologia, visando suprimir a necessidade de padronização do processo que a recebeu, contudo, a tecnologia implantada exigiu um nível de padronização ainda maior.

Todas as empresas entrevistadas eram indústrias, sendo que destas, três iniciaram a transformação digital, pelo processo de integração vertical, as quais adotaram este direcionamento, tão somente, para a resolução de problemas pontuais, pois não tinham conhecimentos, acerca da aplicação de modelos de maturidade. As demais empresas adotaram tecnologias distintas, selecionadas sem um critério claro. Sendo assim, ao definir claramente a motivação e objetivos para a adoção de novas tecnologias (Ghobakhloo e Iranmanesh 2021), buscando o alinhamento destes com uma das quatro dimensões de aplicações tecnológicas propostas por Frank, Delanogare e Ayala (2019a), conforme apresentado na Quadro 3.1, a empresa terá maior assertividade na escolha de soluções tecnológicas que, de fato, agreguem valor ao negócio.

O detalhamento de como implementar os tópicos: por que, o que e para o que mudar foram apresentados por Kappes e Ayala (2022) nas Seções 2.4.1 a 2.4.3. Na pesquisa são recomendadas a aplicação de ferramentas de avaliação com potencial para definir objetivos, analisar o nível de maturidade da organização, bem como definir soluções tecnológicas alinhadas com objetivos estratégicos e processos da empresa. A pesquisa considera ainda, aspectos tangíveis e intangíveis do contexto da empresa como: os custos envolvidos no processo de implantação, a cultura organizacional e sua interface com os novos processos resultantes, a produção de produtos especializados, a capacidade estabelecer alianças com novos parceiros como universidades, consultorias, outras empresas e instituições de fomento a inovação, assim como qual definir qual será a participação dos seus funcionários no processo de implantação.

3.4.2 Pré-requisitos para a implantação da I4.0

A principal dificuldade observada na pesquisa foi a falta do conhecimento para orientar o projeto de transformação digital das empresas. Apenas três dos entrevistados tinham o conhecimento necessário para tanto. A necessidade de aquisição de conhecimento é um dos principais fatores de sucesso, amplamente discutido na literatura, visando assegurar assertividade no processo de implantação da I4.0 (Kahle et al., 2020; Benitez, Ayala e Frank 2020; Mouef et al., 2019; Tortorella et al., 2020; Mittal et al., 2018).

As tecnologias de base já mencionadas por Frank, Delanogare e Ayala (2019a), compõem

os pré-requisitos comuns a qualquer uma das dimensões *Smart*. Contudo, se faz necessário buscar junto aos fornecedores, os pré-requisitos mínimos de infraestrutura para a aplicação da solução tecnológica escolhida (Branco et al., 2019). Conforme proposto por Kappes e Ayala (2022), os tópicos 1 e 2 do modelo conceitual (Figura 3.1) fundamentam o processo de implantação e são essenciais para definir o nível de maturidade da empresa. Os autores ainda complementam que a análise dos tópicos 2, 3 e 4 do mesmo modelo, contribuem para definir o nível de prontidão das empresas. Na seção 3.4.5, a implantação das soluções tecnológicas, são apresentadas quatro estruturas alinhadas com as quatro dimensões *Smart*, em que são descritos os pré-requisitos a serem observados em cada dimensão e nível de maturidade da empresa.

3.4.3 Gestão do processo de implantação

3.4.3.1 Definição da equipe de projeto

Mesmo com a expectativa elevada, com relação aos resultados, apenas a Empresa F dispõe de uma equipe dedicada, para a implantação de novos projetos, já as Empresas E e I contrataram consultorias externas. As demais utilizaram profissionais da própria empresa, algumas sem o conhecimento necessário, o que dificultou a gestão do processo de implantação.

Um dos aspectos fundamentais para o sucesso em projetos de implantação de I4.0 é a definição do gestor e equipe de implantação, sendo que este gestor deve assegurar que a equipe disponha do conhecimento necessário ao processo de implantação da I4.0, ou contratar profissional especializado (Mittal et al., 2018; Müller, Buliga e Voigt 2018; Tabim, Ayala e Frank 2021; Benitez, Ayala e Frank 2020).

3.4.3.2 Prospecção e validação de fornecedores

A implantação de soluções tecnológicas podem ocorrer, por meio da aquisição ou pelo desenvolvimento da nova tecnologia. As Empresas A e B optaram pelo desenvolvimento da tecnologia que lhes interessava, vendo como vantagem o elevado nível de customização da solução tecnológica resultante. Contudo, as mesmas empresas descrevem como desvantagem o longo tempo de desenvolvimento e implantação. Já as Empresas C, D, E e I receberam indicações de quais tecnologias aplicarem aos seus processos, mas não receberam indicações de potenciais fornecedores ou mesmo de como prospectá-los.

Preferencialmente, a aquisição de soluções tecnológicas deve ser analisada e validada em mais de um fornecedor, pois assim será possível analisar qual terá melhores condições de contribuir para o atendimento dos objetivos estratégicos e processos inerentes ao negócio (Daneshgar, Low e Lugkana 2013). É fundamental, que a empresa tenha um profissional qualificado ou contrate serviços terceirizados com domínio em tecnologias da informação e comunicação e, que de preferência, entenda a dinâmica dos processos da empresa (Mittal et al., 2019; Mouef et al., 2019). Kappes e Ayala (2022) na seção 2.4.4.1, apresentam importantes elementos de validação de soluções tecnológicas orientadas para o processo de integração vertical, analisando o contexto da empresa e o nível de estruturação e estratificação dos dados para a tomada de decisões.

3.4.3.3 *Análise de interface de infraestrutura*

Todas as empresas entrevistadas relataram algum tipo de dificuldade no processo de implantação de soluções tecnológicas, seja entre a infraestrutura física das empresas e novos *hardwares* adquiridos, ou no processo de integração entre *softwares*. No que tange a adequação da infraestrutura, as Empresas A, C e E relataram dificuldades na resolução de problemas simples, como prover conectividade e espaço de armazenamento de dados.

Conforme apresentado por Frank, Delanogare e Ayala (2019a) é fundamental que as empresas ao optarem pela inserção no modelo industrial proposto pela I4.0, já tenham consolidadas as tecnologias de base, pois desta forma elas já terão uma estrutura consistente para a implantação de novos *softwares* e *hardwares*. As recomendações das seções anteriores, visando conhecer os pré-requisitos para a implantação, qualificar adequadamente a equipe, assim como analisar e validar novas tecnologias, também contribuem para mitigar a possibilidade de problemas de interface, durante a implantação (Mittal et al., 2018).

3.4.3.4 *Definindo o escopo de projeto*

Apenas as Empresas D, E e I não relataram dificuldades oriundas do planejamento do escopo de implantação dos projetos de adoção de tecnologias da I4.0. As demais relataram dificuldades em: identificar potenciais fornecedores, definir infraestrutura com tecnologias de base, contratação de profissionais qualificados, quebra de paradigmas na cultura organizacional, suporte de tecnologia da informação e comunicação e a falta de padrões de trabalho (Mittal et al., 2018; Mittal et al., 2019; Frank, Delanogare e Ayala 2019a; Tabim, Ayala

e Frank 2021).

Aplicando o processo de pensamento da Teoria das Restrições (Cox III e Schleier Jr. 2013), associado as dimensões *Smart* (Frank, Delanogare e Ayala 2019a), assim como as contribuições deste estudo, a definição do escopo de implantação ficará mais clara e efetiva, pois estará considerando aspectos fundamentais para o sucesso do processo de implantação já definidos anteriormente. Neste momento, todos pré-requisitos de prontidão sinalizados por Mittal et al. (2018), já foram considerados. A disponibilidade de recursos financeiros e cultura organizacional podem ser analisadas durante o alinhamento estratégico, assim como a disponibilidade de recursos técnicos, padrões de trabalho, produtos especializados, participação dos funcionários, assim como alianças e colaboração podem ser averiguados no desenvolvimento dos tópicos das seções anteriores (Seções 3.4.1 a 3.4.3.3).

3.4.3.5 Validação do novo processo

Das empresas entrevistadas, apenas as Empresas B e G desenvolveram projetos pilotos. A Empresa G é fornecedora de tecnologia, sendo assim, é uma prática usual, quando desenvolve um novo produto para o mercado. Já a Empresa B desenvolveu um projeto-piloto com o objetivo de superar barreiras culturais, assim como a resistência de alguns sócios em implementar o projeto em toda a empresa.

Mesmo desenvolvendo o projeto de implantação de forma estruturada, sempre que possível é recomendável que se implemente um projeto-piloto para validar não apenas a tecnologia, mas também o novo processo resultante (Tabim, Ayala e Frank 2021). Esta prática de implementação de projetos pilotos ocorre de forma mais recorrente em empresas com maior nível de maturidade tecnológica (Frank, Delanogare e Ayala 2019a; Longo, Nicoletti e Padovano 2017), mas certamente as pequenas e médias empresas, também podem se beneficiar da mesma. Sendo assim, defina sua estratégia e recursos necessários, capacite os envolvidos e crie um projeto-piloto, pois o mesmo contribuirá para validar os novos processos tornando sua empresa digital (Geissbauer, Vedso e Schrauf 2018).

3.4.4 Avaliação e ajustes no projeto-piloto

Durante a tabulação dos dados obtidos com a pesquisa, foi possível observar que todas as

empresas identificaram lacunas relevantes em avaliação posterior ao processo de implantação das soluções tecnológicas. As oportunidades de melhorias identificadas, foram citadas nas seções anteriores, nas quais todas ratificam que os projetos de implantação não foram bem definidos, mas teriam aprimoramentos preenchendo as lacunas identificadas.

Sendo assim, visando alinhar as características singulares de muitas empresas, há a necessidade de se desenvolver soluções sob medida (Mittal et al., 2018), para que os gestores de projeto possam estabelecer as métricas apropriadas a cada contexto. Neste estudo, a principal métrica de avaliação da evolução efetiva do projeto de implantação será a superação, após a implantação do projeto-piloto, de cada etapa proposta no modelo conceitual, pré-requisitos informados, bem como, dos pontos de controle e orientação, conforme proposto no modelo conceitual apresentado na Figura 3.1, pois o modelo proposto permite integrar um *roadmap* a uma 'avaliação de prontidão' (Mittal et al., 2018).

3.4.5 Implantação de soluções tecnológicas

A amplitude e qualidade da comunicação entre os envolvidos no projeto de implantação das soluções tecnológicas, assim como a falta de um modelo de gestão, para o controle de integração das ações entre equipes distintas, também se caracterizou como um dos elementos que deveriam ser geridos de forma mais eficiente nas empresas entrevistadas. Sendo assim, sua falta ou deficiência, contribuiu para que as equipes cometessem erros desnecessários, aumentando os custos e o tempo de implantação.

Os resultados apresentados sinalizam que, se as empresas seguirem duas diretrizes fundamentais podem ser mais efetivas na aplicação de soluções tecnológicas em todas as dimensões *Smart*, com a aquisição de conhecimento sobre o assunto, seja por membros da empresa ou pela contratação de serviços externos de apoio ao processo de implantação e o planejamento estruturado da execução (Mittal et al., 2018; Mouef et al., 2017; Ghobakhloo e Iranmanesh 2021). A primeira diretriz vai ao encontro da busca por subsidiar a tomada de decisão apoiada no conhecimento existente, ou seja, conhecimento dos pré-requisitos para implantação, a segunda consiste em alinhar este conhecimento com o estado atual e objetivos definidos pela empresa de modo a elaborar o planejamento das ações.

Os Quadros 3.4 a 3.7, complementam as seções anteriores, com uma proposta de *framework* simplificado de implantação para cada uma das dimensões *Smart* propostas por Frank, Delanogare e Ayala (2019a), conforme análises e recomendações propostas a partir do

modelo conceitual da Figura 2.4. Concluídas as reflexões sugeridas na Seção 3.4.1 e definida a dimensão *Smart* a ser implementada, o gestor do projeto pode iniciar a aplicação da dimensão *Smart* desejada definindo o nível de maturidade de sua empresa e, posteriormente, seguindo as recomendações alinhadas com o nível de maturidade identificado na mesma coluna. Uma descrição resumida da escala com os níveis de maturidade é apresentada na primeira e segunda linhas de cada *framework*, assim como, são descritas as características da empresa, em cada nível de transformação digital na terceira linha do mesmo.

No Quadro 3.4 é proposto uma *framework* de implantação de *Smart Manufacturing*, conforme modelo conceitual apresentado. A nova *framework* foi concebido a partir do modelo Acatech, acrescentando o nível zero de maturidade sugerido por Mittal et. al. (2018), que tem como objetivo, permitir que empresas que ainda não concluíram sua jornada na Indústria 3.0, possam entender e iniciar a jornada para a *Smart Manufacturing*.

O *Smart Product & Service System* é a segunda dimensão *Smart* mais aplicada da I4.0. Sua *framework* (Quadro 3.5) segue a mesma lógica do *Smart Manufacturing*, no qual o nível zero corresponde ao produto desconectado, evoluindo para conectado, assistência, cooperação e incorporação de soluções de parceiros.

Diferentemente das duas dimensões anteriores, a evolução nos níveis de maturidade na *Smart Supply Chain* proposta no Quadro 3.6, parte do pré-requisito de que a empresa já disponha de integração vertical em seus processo. Em outras palavras, que a empresa seja informatizada, com cadastros com bom nível de acuracidade em sistema ERP que comporte todos os seus processos.

E por fim, a *framework* da dimensão *Smart Working* (Quadro 3.7), que partindo do nível de maturidade zero, no qual o operador ainda não incorporou tecnologias da I4.0 em suas tarefas, o operador evolui em performance, qualificação e saúde ocupacional.

Quadro 3.4 - Proposta de *framework* para implantação da *Smart Manufacturing*

| Indústria 2.0 | Indústria 3.0 | | Indústria 4.0 | | | |
|--|--|--|--|---|---|--|
| | 0 - Estruturação | 1 - Informatização | 2 - Integração | 3 - Visibilidade | 4 - Transparência | 5 - Simulação |
| (3.4.1) Maturidade: Sem padrões de trabalho e estrutura de TI. | (3.4.1) Maturidade: TI nas operações e em outras áreas. | (3.4.1) Maturidade: Conexão com integração de processos. | (3.4.1) Maturidade: Tomada de decisões em tempo real baseadas em dados. | (3.4.1) Maturidade: Análise de dados, buscando, em relações de causa e efeito. | (3.4.1) Maturidade: Simulação de cenários para tomada de decisão. | (3.4.1) Maturidade: Adaptação dos sistemas em processos autônomos. |
| (3.4.2) Pré-requisitos: Possui bom nível de mecanização. | (3.4.2) Pré-requisitos: • VSM – <i>Value Stream Mapping</i> . • Espaço adequado de armazenamento de dados em nuvem ou em servidor. | (3.4.2) Pré-requisitos: • Ótimo espaço de armazenamento de dados em nuvem ou em servidor. • Bom nível de automação ou máquinas passíveis de sensorização. | (3.4.2) Pré-requisitos: • VSM. • ERP com cadastros bem estruturados. • Espaço adequado para armazenamento de dados. • Máq. automatizadas ou sensorizadas. | (3.4.2) Pré-requisitos: • Bancos de dados estruturados, atualizados em tempo real e com elevado nível de acuracidade. | (3.4.2) Pré-requisitos: • Bancos de dados. • Modelos estatísticos de correlação. | (3.4.2) Pré-requisitos: • Automação. • Modelos de predição. • Modelos de simulação. • Inteligência artificial. |
| (3.4.3) Gestão: Instalação de rede e <i>hardwares</i> compatíveis com as necessidades dos próximos níveis. | (3.4.3) Gestão: Assegurar que todos os processos críticos estão corretamente documentados e mensurados. | (3.4.3) Gestão: Assegurar a prestação de serviços de internet com boa velocidade de processamento e estável. | (3.4.3) Gestão: Assegurar registro de dados, informações e indicadores alinhados com fluxo de informações do VSM. | (3.4.3) Gestão: Assegurar a análise e tomada de decisão baseada em informações e conhecimento acumulado. | (3.4.3) Gestão: Assegurar a atualização tecnológica e a constante capacitação da equipe. | (3.4.3) Gestão: Assegurar a atualização e suporte tecnológico contínuo, assim como dos pressupostos dos demais níveis. |
| (3.4.4) Métricas de avaliação: Processos críticos padronizados e incorporados por rede de TI. | (3.4.4) Métricas de avaliação: Assegurar a acuracidade dos dados em todos os processos críticos. | (3.4.4) Métricas de avaliação: Transmissão de dados em tempo real, segura, rápida, e sem perda de sinal. | (3.4.4) Métricas de avaliação: Acuracidade dos registros. | (3.4.4) Métricas de avaliação: • Indicadores de resultado. • Indicadores de eficiência. | (3.4.4) Métricas de avaliação: Performance analisada em cenários de simulação, antecipando as relações causa-efeito. | (3.4.4) Métricas de avaliação: Processos altamente flexíveis, eficientes e eficazes. |
| (3.4.5) Ações: • Contratar profissionais ou terceiros nas áreas de TI e eng. de processos. • Instalar <i>hardwares</i> e rede de TI. • Definir padrões de trabalho. • Introduzir automação nos processos. | (3.4.5) Ações: • Pesquisar e contratar fornecedores de ERP alinhados com o VSM. • Cadastrar padrões de processo, tempos de ciclo e <i>set up</i> , estruturas de produtos e outros cadastros relevantes no ERP. | (3.4.5) Ações: • Instalar rede de IoT cabeada ou por WIFI. • Qualificar internamente usuário chave para a rede e ERP. • Sensorizar máquinas não automatizadas. | (3.4.5) Ações: • Pesquisar, definir e adquirir: SCADA, MES e/ou APS, RFID. • Sensorizar máquinas não automatizadas. • Implantar sistemas. • Capacitar equipe. | (3.4.5) Ações: Elaborar modelos estatísticos de correlação, visando identificar oportunidades de mitigar as restrições, identificando a causa raiz das não conformidades. | (3.4.5) Ações: Aplicar: AI a modelos estatísticos de correlação prevendo cenários, simulação de processos, virtualização (gêmeos digitais, comissionamento virtual), robótica, AGV, manufatura aditiva. | (3.4.5) Ações: Aplicar: sistema responsivo, tecnologias: M2M AMR, identificação automática de não-conformidades, outras tecnologias e adaptativas. |

A *framework* apresentada no Quadro 3.4 é uma proposta de aprimoramento do modelo de maturidade da Acatech Schuh et al. (2017), que incorporara um nível zero de maturidade, assim como métricas para autoavaliação sinalizadas por Mittal et. al. (2018). Os demais elementos são contribuições deste estudo, e seguem o modelo conceitual proposto, no qual a aplicação de ferramentas, como o VSM e outras foram detalhadas por Kappes e Ayala (2022).

Quadro 3.5 - Proposta de *framework* para implantação do *Smart Product & Service System*

| Product | Smart Product | Smart Product & Service System | | |
|--|---|--|--|--|
| | | 2 - Assistência | 3- Cooperação | 4 - Incorporação |
| 0 – Desconectado | 1 - Conectado | 2 - Assistência | 3- Cooperação | 4 - Incorporação |
| (3.4.1) Maturidade: Produto executa a tarefa para o qual foi concebido. | (3.4.1) Maturidade: Produto com potencial para ampliar a agregação de valor percebida pelo cliente. | (3.4.1) Maturidade: Produto conectado, apto para fornecer dados para prestação de serviços | (3.4.1) Maturidade: Produtos conectados com serviços de suporte complementares. | (3.4.1) Maturidade: Integração com outros sistemas. |
| (3.4.2) Pré-requisitos: • QFD – <i>Quality Function Deployment</i> • Equipe multidisciplinar de projeto de produtos e serviços; robusta, criativa e versátil. | (3.4.2) Pré-requisitos: • Produto sensorizado. • Projeto ou (re)projeto de produto aprovado. • Espaço em nuvem para armazenamento de dados. | (3.4.2) Pré-requisitos: • QFD. • Base de dados consistente. • Equipe multidisciplinar de projeto de produtos e serviços; robusta, criativa e versátil. | (3.4.2) Pré-requisitos: • Definir: desenvolver sozinho ou com parcerias? • Equipe multidisciplinar de projeto de produtos e serviços; robusta, criativa e versátil. | (3.4.2) Pré-requisitos: • Parceiros de negócio. • Equipe multidisciplinar de projeto de produtos e serviços; robusta, criativa, versátil e com conhecimento multidisciplinar de sistemas distintos. |
| (3.4.3) Gestão: Assegurar que o produto tenha condições de estender seu ciclo de vida. | (3.4.3) Gestão: Assegurar espaço em nuvem adequado para volume de dados. | (3.4.3) Gestão: Gestão de dados, visando otimizar serviços, bem como para nortear novos projetos de produtos & serviços. | (3.4.3) Gestão: Assegurar a atualização tecnológica e a constante capacitação da equipe. | (3.4.3) Gestão: Gestão do portfólio de produtos e serviços com possibilidade de cobrança pelo uso e não pela posse. |
| (3.4.4) Métricas de avaliação: Produtos bem avaliados pelos clientes, com potencial para incorporar inovações e devidamente sensorizados. | (3.4.4) Métricas de avaliação: Transmissão de dados em tempo real, segura, rápida e sem perda de sinal | (3.4.4) Métricas de avaliação: Gestão de demanda por serviços. | (3.4.4) Métricas de avaliação: Gestão de demanda por serviços: quantidade, qualidade e complexidade. | (3.4.4) Métricas de avaliação: Elevado nível do estágio de maturidade do produto & serviço. |
| (3.4.5) Ações: • Realizar análise crítica do projeto do produto e realizar alterações se necessário. • Instalar dispositivos de captura de sinais (sensores, atuadores e outros). | (3.4.5) Ações: • Instalar sistema supervisorio (SCADA) para coleta de sinais de entrada, saída, variáveis de uso e outros dados relevantes. • Habilitar conexão com a web para sistema supervisorio. | (3.4.5) Ações: • Analisar, desenvolver e disponibilizar serviços de pós venda como: • Manutenção corretiva remota c/ realidade aumentada. • Manutenção preventiva. • Controle de performance, notificações de uso. • Monitoramento de eficiência energética. | (3.4.5) Ações: Introduzir: • M2M. • Robótica. • Dispositivos de rastreamento. • Serviços que melhorem a experiência de uso. • Capacitações em ambiente virtual. | (3.4.5) Ações: • Firmar parcerias com outros fornecedores, universidades e institutos. • Avaliar a integração de múltiplos sistemas de serviços. |

O Quadro 3.5 apresenta uma estrutura, partindo da premissa, de que o produto ainda possui potencial, para a agregação de valor ao cliente. Sendo assim, é fundamental que se estabeleça, até onde vai à percepção de valor do cliente, utilizando o QFD (*Quality Function Deployment*) (Lai e Ming 2002; Bossert 1991).

Quadro 3.6 - Proposta de *framework* para implantação do *Smart Supply Chain*

| Indústria 3.0 | | Indústria 4.0 | | |
|--|--|--|---|---|
| 1 - Integração Vertical | 2 – Visibilidade | 3 – Integração Horizontal | 4 - Automação | 5 – Autogestão |
| (3.4.1) Maturidade: TI nas operações e em outras áreas, buscando por integração vertical. | (3.4.1) Maturidade: Conexão e integração com sistemas de gestão de estoque. | (3.4.1) Maturidade: Rastreabilidade e compartilhamento de dados com gestão de estoque. | (3.4.1) Maturidade: Movimentação e estocagem realizada por sistemas ciber físicos. | (3.4.1) Maturidade: Características: Autogestão dos processos internos de gestão de estoques. |
| (3.4.2) Pré-requisitos: • VSM - <i>Value Stream Mapping</i> . • Espaço de armazenamento de dados em nuvem ou em servidor. | (3.4.2) Pré-requisitos: • Espaço de armazenamento de dados em nuvem ou em servidor. • Cadastro de produtos consistente, com excelente acuracidade no ERP. | (3.4.2) Pré-requisitos: • VSM. • ERP e WMS com cadastros bem estruturados. • Espaço adequado para armazenamento de dados em nuvem. | (3.4.2) Pré-requisitos: • VSM. • Infraestrutura física compatível para automação de processos. • Sistemas de gestão bem estruturados. | (3.4.2) Pré-requisitos: • Automação. • Sistemas de gestão bem estruturados. • Trabalho padronizado. |
| (3.4.3) Gestão: Assegurar que todos os produtos estão corretamente cadastrados no ERP. | (3.4.3) Gestão: Assegurar a prestação de serviços em tempo real, confiável e estável. | (3.4.3) Gestão: Nível de serviço elevado com baixo custo operacional. | (3.4.3) Gestão: Assegurar modelo de gestão de operações estruturado e padronizado. | (3.4.3) Gestão: Assegurar a atualização e suporte tecnológico contínuo, assim como os pressupostos dos demais níveis. |
| (3.4.4) Métricas de avaliação: Assegurar a acuracidade de todos os cadastros de produtos. | (3.4.4) Métricas de avaliação: Transmissão de dados em tempo real, segura, rápida e sem perda de sinal. | (3.4.4) Métricas de avaliação: Elevado nível de OTIF (<i>On-Time In-Full</i>). | (3.4.4) Métricas de avaliação: Redução do <i>lead time</i> e custos operacionais. | (3.4.4) Métricas de avaliação: Processos altamente flexíveis, eficientes e eficazes. |
| (3.4.5) Ações: • Pesquisar e contratar fornecedor de ERP alinhado com o VSM. • Cadastrar produtos e estrutura de produtos no ERP. | (3.4.5) Ações: • Instalar rede de IoT cabeada ou por WIFI. • Pesquisar e contratar fornecedor de WMS - (<i>Warehouse Management System</i>) alinhado com VSM. | (3.4.5) Ações: • Implantar: plataforma digital para compartilhamento e gestão dados e RFID. • Definir parceiro(s) p/ compartilhar dados. • Estabelecer contrato formal: Governança, compromissos, cyber-segurança. | (3.4.5) Ações: • Introduzir: M2M, AGVs, AMRs e robótica na preparação de cargas. | (3.4.5) Ações: • Aplicar: sistema responsivo estruturado com inteligência artificial. |

Durante a pesquisa foi observado que um dos entraves ao sucesso da *Smart Supply Chain* é a falta de disciplina para manter os registros atualizados e com acuracidade. A falta de padrões de trabalho também se caracteriza como um problema recorrente.

Quadro 3.7 - Proposta de *framework* para implantação do *Smart Working*

| Operador 3.0 | Operador 4.0 | | Operador 5.0 |
|--|---|---|---|
| 0 – Tradicional | 1 – Performance | 2 – Qualificação | 3 – Saúde Ocupacional |
| (3.4.1) Maturidade: Empresas com ou sem processos mecanizados com uso intensivo de mão de obra. | (3.4.1) Maturidade: Tecnologia ajuda o operador a fazer ainda melhor a sua atividade original. | (3.4.1) Maturidade: Operador precisa aprender novas habilidades para realizar outras funções. | (3.4.1) Maturidade: Tecnologia simplifica as tarefas do operador a ponto da empresa depender menos dele para executar a atividade. |
| (3.4.2) Pré-requisitos: • Tarefas executadas com operações manuais não passíveis de mecanização ou automação. • Impossibilidade por motivos distintos de realizar a automação de operações insalubres e/ou inseguras. • Conhecimento da legislação trabalhista no que tange a saúde ocupacional. | (3.4.2) Pré-requisitos: • VSM. • Análise de capacidades descritas no perfil de cargo. • Análise do AET e do APR. • Controle de desempenho na execução da rotina. | (3.4.2) Pré-requisitos: • VSM. • Análise do AET e do APR. • Infraestrutura física compatível para automação de processos. • Sistemas de gestão bem estruturados. • Definir novos conhecimentos necessários. | (3.4.2) Pré-requisitos: • Análise Ergonômica do Trabalho (AET). • Análise preliminar de riscos (APR). • Processos já possuem algum nível de automação. • Padrões de trabalho consolidados. |
| (3.4.3) Gestão: Assegurar, que as análises sejam realizadas por profissionais habilitados com registro atualizado nos órgãos de classe competentes. | (3.4.3) Gestão: Assegurar que solução tecnológica a ser implementada não amplie ou crie condições insalubres e/ou de risco ao trabalhador. | (3.4.3) Gestão: • Novas tecnologias devem ser testadas e aprovadas. • Capacitações devem ser explícitas e de fácil acesso. | (3.4.3) Gestão: • Novas tecnologias devem ser testadas e aprovadas. • Novas tecnologias não podem causar “novas” doenças ocupacionais. |
| (3.4.4) Métricas de avaliação: Assegurar que avaliações foram estendidas a todas as tarefas que necessitam de pessoas para a sua conclusão. | (3.4.4) Métricas de avaliação: Aumento de desempenho do trabalhador. | (3.4.4) Métricas de avaliação: Incremento de eficácia do trabalho e saúde ocupacional. | (3.4.4) Métricas de avaliação: Níveis de produtividade, qualidade e saúde ocupacional. |
| (3.4.5) Ações: • Realizar VSM, AET e APR, detalhando tarefas com operações manuais. • Identificar oportunidades de ampliar a capacidade e/ou condições de trabalho do operador. | (3.4.5) Ações: • Definir capacidade a ser ampliada no operador, conforme demandas previstas no perfil: força, análise, virtualização e outras. • Implantar solução tecnológica alinhada com VSM e capacidade definida. | (3.4.5) Ações: Capacitação profissional, visando preparar o operador ao novo contexto com a utilização de tecnologias como: realidade virtual e aumentada, gêmeos digitais, assistentes habilitados por voz e outros. | (3.4.5) Ações: Implantar: sistemas com automação de tarefas, <i>Cobots</i> , veículos guiados automatizados e autônomos, inteligência artificial no sistema produtivo e outras tecnologias. |

A estrutura proposta para o *Smart Working* evolui, conforme aumenta o nível de integração entre operador e tecnologia. Sendo assim, vai ao encontro da proposta da União Europeia, para criar uma manufatura centrada no ser humano, que foi denominada Indústria 5.0, sendo considerada uma expansão da Indústria 4.0 (Breque et al., 2021).

3.5 Conclusões

3.5.1 Contribuições teóricas

Este artigo se propõe a apresentar um modelo de *roadmap* alinhado com as quatro macros dimensões de aplicação tecnológica propostas por Frank, Delanogare e Ayala (2019a), em um modelo orientado para a jornada rumo a I4.0. A pesquisa ratifica a necessidade da aquisição de conhecimento, amplamente discutido na literatura, visando assegurar assertividade no processo de implantação da I4.0 (Kahle et al., 2020; Benitez, Ayala e Frank 2020; Mouef et al., 2019; Tortorella et al., 2020; Mittal et al., 2018). Outro aspecto relevante observado, foi o impacto das decisões estratégicas no sucesso dos projetos de implantação de soluções tecnológicas (Ghobakhloo e Iranmanesh 2021), pois os projetos estruturados, a partir destas decisões obtiveram melhores resultados.

Os resultados obtidos confirmam a premissa, na qual as empresas carecem de um direcionamento alinhado com suas singularidades para iniciarem a jornada rumo I4.0 (Mittal et al., 2018). O estudo demonstra que os modelos de gestão de projetos de tecnologia adotados por muitas empresas, ainda não estão adequadamente estruturados para este novo cenário industrial que se apresenta.

3.5.2 Implicações práticas

O estudo fornece caminhos distintos, para o processo de transformação digital. O *roadmap* proposto apresenta um passo a passo, para que gestores de projetos tenham condições de planejar o processo de implantação de I4.0 de forma customizada, alinhando os objetivos da empresa, tecnologias disponíveis e singularidades da organização. Neste sentido, além do *roadmap* proposto, os gestores, ainda tem a sua disposição as quatro *frameworks* alinhadas com as tecnologias *front-end* propostas por Frank, Delanogare e Ayala (2019a).

3.5.3 Limitações e pesquisas futuras

Este estudo apresenta algumas limitações que abrem caminhos para novas pesquisas. Além de aumentar em tamanho e diversidade do espaço amostral, pois, desta forma seria

possível, também extrapolar a pesquisa em dados quantitativos, pois se entende, que, talvez seja oportuno colocar um grupo de empresas na amostra, para posterior cruzamento dos dados, que, ainda não tenham iniciado o processo, considerando-as como marco zero do processo de digitalização.

Como pesquisas futuras é possível destacar a dificuldade de integração de novas soluções tecnológicas, tendo em vista a falta de padrões básicos, que deveriam ser considerados, durante o desenvolvimento das mesmas. Percebe-se ao dialogar com usuários e fornecedores, que o desenvolvimento de *softwares* e *hardwares* poderia ser fundamentado em alguns atributos básicos comuns, que teria, entre outros objetivos, facilitar o processo de integração.

3.6 Referências

Ayala, N.F., Paslauski, C.A., Ghezzi, A., & Frank, A.G. (2017). “Knowledge sharing dynamics in service suppliers' involvement for servitization of manufacturing companies”, *International Journal of Production Economics*, 193, 538-553, doi:org/10.1016/j.ijpe.2017.08.019

Benitez, G.B., Ayala, N.F., & Frank, A.G. (2020). “Industry 4.0 innovation ecosystems: An evolutionary perspective on value cocreation”, *International Journal of Production Economics*, 228, doi:org/10.1016/j.ijpe.2020.107735

Bossert, J.L. (1991). “Quality Function Deployment: A practitioner's approach”. (1st ed.). CRC Press. doi:org/10.1201/9781003066545

Branco, I.C., Jesus, F.C., & Oliveira, T. (2019). “Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union”, *Computers in Industry*, (107), 22-32, doi:org/10.1016/j.compind.2019.01.007

Breque, M., Nul, L. & A. Petridis D. (2021). “Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric, and resilient European industry”. *Directorate-General for Research and Innovation, European Commission*. Available at: https://ec.europa.eu/info/news/industry-50-towards-more-sustainable-resilient-and-human-centric-industry-2021-jan-07_en#:~:text=The%20report%20%E2%80%9CIndustry%205.0%E2%80%9D%20published,centre%20of%20the%20production%20process

Bueno, A., Filho, M., & Frank, A.G. (2020). “Smart production planning and control in the Industry 4.0 context: A systematic literature review”, *Computers & Industrial Engineering*, doi:org/10.1016/j.cie.2020.106774

Ceschin, F. (2013). “Critical factors for implementing and diffusing sustainable product-Service systems: insights from innovation studies and companies' experiences”, *Journal of Cleaner Production*, (45), 74-88, doi:org/10.1016/j.jclepro.2012.05.034

Ching, N.T., Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Maroufkhani, P., & Asadi, S. (2022). “Industry 4.0 applications for sustainable manufacturing: A systematic literature review and a roadmap to sustainable development”, *Journal of Cleaner Production*, (334), 130133, doi:org/10.1016/j.jclepro.2021.130133

CNI. (2020). “Pesquisa: A Indústria 4.0 e a pandemia”. https://static.portaldaindustria.com.br/portaldaindustria/noticias/media/filer_public/de/cc/decc6afa-ae64-4160-9b3c-87d7dcd4b3d6/a_industria_40_e_a_pandemia.pdf

Colli, M., Berger, U., Bockholt, M., Madsen, O., Møller, O., & Wæhrens, B.V. (2019). “A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0”, *Annual Reviews in Control*, (48), 165-177, doi:org/10.1016/j.arcontrol.2019.06.001

Cox III, JF, Jr, JGS. (2013). “Theory of Constraints Handbook”. *Porto Alegre: Bookman*. [https://books.google.com.br/books?id=gyE4AgAAQBAJ&lpg=PR3&ots=GYaxVZS5Xt&dq=Cox%20III%2C%20James%20F.%20Jr%2C%20John%20G.%20Schleier.%20Theory%20of%20Constraints%20Handbook.%20\(2013\).%20Porto%20Alegre%20%3A%20Bookman%2C%202013.&lr&hl=pt-BR&pg=PR3#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=gyE4AgAAQBAJ&lpg=PR3&ots=GYaxVZS5Xt&dq=Cox%20III%2C%20James%20F.%20Jr%2C%20John%20G.%20Schleier.%20Theory%20of%20Constraints%20Handbook.%20(2013).%20Porto%20Alegre%20%3A%20Bookman%2C%202013.&lr&hl=pt-BR&pg=PR3#v=onepage&q&f=false)

Culot, G., Orzes, G., Sartor, M., & Nassimbeni, G. (2020). “The future of manufacturing: A Delphi-based scenario analysis on Industry 4.0”, *Technological Forecasting and Social Change*, (157), 120092, doi:org/10.1016/j.techfore.2020.120092

Dalenogare, L.S., Benitez, G.B., Ayala, N.F., & Frank, A.G. (2018). “The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance”, *International Journal of Production Economics*, (204), 383-394, doi:org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019

Daneshgar, F., Low, G.C., Worasinchai, L. (2013). “An investigation of ‘build vs. buy’ decision for software acquisition by small to medium enterprises”, *Information and Software Technology*, (55), 10, 1741-1750, doi:org/10.1016/j.infsof.2013.03.009

Dornelles, J.A., Ayala, N.F. & Frank, A.G. (2021). “Smart working in Industry 4.0: How digital technologies enhance manufacturing workers' activities”, *Computers & Industrial Engineering*, 163: 107804, doi:org/10.1016/j.cie.2021.107804

Eisenhardt, K.M., & Graebner, M.E. (2007). “Theory building from cases: Opportunities and challenges”. *Academy Management Journal* (50), 25–32. <http://www.jstor.org/stable/20159839>

Frank, A.G., Delanogare, L.S., & Ayala, N.F. (2019a). “Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies”, *International Journal of Production Economics*, (210), 15-26, doi:org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004

Frank, A.G., Mendes, G.H.S., Ayala, N.F., & Ghezzi, A. (2019b). “Servitization and Industry 4.0 convergence in the digital transformation of product firms: A business model innovation perspective”, *Technological Forecasting and Social Change*, (141) 341-351, doi:org/10.1016/j.techfore.2019.01.014

Frederico, G.F. Garza-Reyes, J.A. Anosike, A. & Kumar, V. (2020), “Supply Chain 4.0:

concepts, maturity and research agenda”, *Supply Chain Management*, (25)2, 262-282. doi:org/10.1108/SCM-09-2018-0339

Geissbauer, R., Vedso J., & Schrauf, S. (2018). “Industry 4.0: building the digital Enterprise: 2016 global industry 4.0 survey Retrieved April 2018 from Munich”. <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>

Ganzarain, J., & Errasti, N. (2022). “Three stage maturity model in SME’s toward industry 4.0”. *Journal of Industrial Engineering and Management*, (9), 5, 1119-1128. dx.doi:org/10.3926/jiem.2073

Ghobakhloo, M., & Iranmanesh, M. (2021). “Digital transformation success under Industry 4.0: a strategic guideline for manufacturing SMEs”, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32(8), 1533-1556, doi:org/10.1108/JMTM-11-2020-0455

Goldratt, E. M. (1990). “What Is This Thing Called Theory of Constraints and How It Should Be Implemented?” *New York, North River Press*. <http://brharnetc.edu.in/br/wp-content/uploads/2018/11/5.pdf>

Hofmann, E., & Rüsçh, M. (2017). “Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics”, *Computers in Industry*, (89) 23-34, doi:org/10.1016/j.compind.2017.04.002

Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). “Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Securing the future of German manufacturing industry”. *Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. Acatech, Forschungsunion*. <https://docplayer.net/254711-Securing-the-future-of-german-manufacturing-industry-recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0.html>

Kahle, J.H., Marcon, E., Ghezzi, A., & Frank, A.G. (2020). “Smart products value creation in SMEs innovation ecosystems”, *Technological Forecasting and Social Change*, (156) 120024, doi:org/10.1016/j.techfore.2020.120024

Kappes, L. & Ayala N. F. (2022). “Artigo 01 – Pré-requisitos para a implantação da Industria 4.0 em pequenas e médias empresas: Um roteiro em quatro dimensões”. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, *PMPEP - UFRGS*

Kipper, L.M., Furstenau, L.B., Hoppe, D., Frozza, R. & Iepsen, S. (2020). “Scopus scientific mapping production in industry 4.0 (2011–2018): a bibliometric analysis”. *International Journal of Production Research* 58: 1605-1627, doi:org/10.1080/00207543.2019.1671625

Kusiak, A., 2018. “Smart manufacturing”, *International Journal of Production Research*, 56(1-2): 508-517, doi:org/10.1080/00207543.2017.1351644

Lai, K.C., & Ming, L.W. (2002). “Quality Function Deployment: A Comprehensive Review of Its Concepts and Methods”, *Quality Engineering*, 15(1): 23-35, doi:org/10.1081/QEN-120006708

Lee, J, Jun., S, Chang, T.W., & Park, J. (2017). “A smartness assessment framework for smart

factories using analytic network process”. *Sustainability*, 9(5), 794, doi:org/10.3390/su9050794

Longo, F., Nicoletti, L., & Padovano, A. (2017). “Smart operators in industry 4.0: A human-centered approach to enhance operators’ capabilities and competencies within the new smart factory context”, *Computers & Industrial Engineering*, (113), 144-159, doi:org/10.1016/j.cie.2017.09.016

Lu, H.P., Weng, C.I. (2018). “Smart manufacturing technology, market maturity analysis and technology roadmap in the computer and electronic product manufacturing industry”, *Technological Forecasting and Social Change*, (133), 85-94, doi:org/10.1016/j.techfore.2018.03.005

Marodin, G.A., Frank, A.G., Tortorella, G.L., & Saurin, T.A. (2016). “Contextual factors and lean production implementation in the Brazilian automotive supply chain”, *Supply Chain Management*, 21(4): 417-432, doi:org/10.1108/SCM-05-2015-0170

Martins, G.A. (2006). “Estudo de Caso: Uma estratégia de pesquisa”. *São Paulo: Atlas*. https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=Martins%2C+Gilberto+de+Andrade.%2C+2006.+Estudo+de+Caso%3A+Uma+estrat%C3%A9gia+de+pesquisa.+S%C3%A3o+Paulo%3A+Atlas.&btnG=

Meindl, B., Ayala, N.F., Mendonça, J., & Frank, A.G. (2021). “The four smarts of Industry 4.0: Evolution of ten years of research and future perspectives”, *Technological Forecasting and Social Change*, (168), 120784, doi:org/10.1016/j.techfore.2021.120784

Meudt, T., Metternich, J., & Abele, E. (2017). “Value stream mapping 4.0: Holistic examination of value stream and information logistics in production”, *CIRP Annals*, 66(1), 413-416, doi:org/10.1016/j.cirp.2017.04.005

Mittal, S., Khan, M.A., Romero, D., & Wuest, T. (2018). “A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs)”, *Journal of Manufacturing Systems*, (49), 194-214, doi:org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005

Mittal, S., Khan, M.A., Purohit, J.K., Menon, K., Romero, D., & Wuest, T. (2019). “A smart manufacturing adoption framework for SMEs”, *International Journal of Production Research*, 58(5), 1555-1573, doi:org/10.1080/00207543.2019.1661540

Mouef, A., Simon, R., Lamouri, S., Giraldo, S.T., & Barbaray, R. (2017). “The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0”, *International Journal of Production Research*, 56(3), 1118-1136, doi:org/10.1080/00207543.2017.1372647

Mouef, A., Lamouri, S., et al. (2019). “Identification of critical success factors, risks and opportunities of Industry 4.0 in SMEs”, *International Journal of Production Research*, 58(5), 1384-1400, doi:org/10.1080/00207543.2019.1636323

Müller, J.M., Buliga, O., & Voigt, K.I. (2018). “Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0”, *Technological Forecasting and Social Change*, (132), 2-17, doi:org/10.1016/j.techfore.2017.12.019

Pfohl, H.C., Yahsi, B., & Kurnaz, T. (2017). "Concept and diffusion-factors of Industry 4.0 in the supply chain. *Dynamics in Logistics*". Springer. 381-390, doi:org/10.1007/978-3-319-45117-6_33

Prinsloo, J., Vosloo, J.C., & Mathews, E.H. (2018). "Towards Industry 4.0: A roadmap for the south African heavy industry sector". *Journal of Industrial Engineering*. 30(3), 174-186, doi:org/10.7166/30-3-2237

Qin, J., Liu, Y. & Grosvenor, R. (2016). "A Categorical framework of manufacturing for Industry 4.0 and beyond", *Procedia CIRP*, (52), 173-178, doi:org/10.1016/j.procir.2016.08.005

Rockwell Automation. (2014). "The connected enterprise maturity model retrieved april 2018 from Rockwell Automation"; http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/cie-wp002_-en-p.pdf

Romero, D., Bernus, P., Noran, O., Stahre, J. & Fast-Berglund, Å. (2016). "The Operator 4.0: Human cyber-physical systems & adaptive automation towards human-automation symbiosis work systems". In: Nääs I. et al. (eds) *Advances in Production Management Systems. Initiatives for a Sustainable World. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 488. Springer, Cham, doi:org/10.1007/978-3-319-51133-7_80

Scher, A.W., & Hoffmann, M. (2015). "The process of business management". In: vom Brocke, J. Rosemann, M. (eds) *Handbook on business process management 2. International of Information Systems*. Springer, Berli, Heidelberg, doi:org/10.1007/978-3-642-45103-4_5

Shewhart, W.A. (1931). "Economic control of quality of manufactured product". *Macmillan And Co Ltd*, London. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Economic%20control%20of%20quality%20of%20manufactured%20product&author=W.A.%20Shewhart&publication_year=1931

Schuh, G., Gausemeier, J., Hompel M., & Wahlster W. (2017). "Industrie 4.0 maturity index". Retrieved April 2018 from 2017 http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Projektberichte/acatech_STUDIE_Maturity_Index_eng_WEB.pdf

Schumacher, A., Erol, S. & Sihm, W. (2016). "A maturity model for assessing Industry 4.0 Readiness and maturity of manufacturing enterprises", *Procedia CIRP*, 52: 161-166, doi:org/10.1016/j.procir.2016.07.040

Schwab, K. (2017). "The Fourth Industrial Revolution", *first ed. World Economic Forum*. [https://books.google.com.br/books?id=ST_FDAAAQBAJ&lpg=PR7&ots=DUIv4RuCYS&dq=Schwab%2C%20K.%2C%20\(2017\).%20The%20Fourth%20Industrial%20Revolution%2C%20first%20ed.%20World%20Economic%20Forum&lr&hl=pt-BR&pg=PP1#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=ST_FDAAAQBAJ&lpg=PR7&ots=DUIv4RuCYS&dq=Schwab%2C%20K.%2C%20(2017).%20The%20Fourth%20Industrial%20Revolution%2C%20first%20ed.%20World%20Economic%20Forum&lr&hl=pt-BR&pg=PP1#v=onepage&q&f=false)

Stock, T., Obenaus, M., Kunz, S., & Kohl, H. (2018). "Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: A qualitative assessment of its ecological and social potential", *Process Safety and Environmental Protection*, (118), 254-267, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.026>

Tabim, V.M., Ayala, N.F., & Frank, A.G. (2021). "Implementing vertical integration in the

Industry 4.0 journey: Which factors influence the process of information in the systems adoption?" *Information Systems Frontier*, doi:org/10.1007/s10796-021-10220-x

Thoben, K.D., Wiesner, S., & Wues, T. (2017). "Industrie 4.0 and smart manufacturing - a review of research issues and application examples". *International journal of automation technology*, 11(1): 4-16. <https://www.fujipress.jp/ijat/au/ijate001100010004/>

Tortorella, G.L., Vergara, A.M.C., Reyes, J.A.G. & Sawhney, R. (2020). "Organizational learning paths based upon industry 4.0 adoption: An empirical study with Brazilian manufacturers", *International Journal of Production Economics*, (219), 284-294, doi:org/10.1016/j.ijpe.2019.06.023

Voss, C., Tsirikysis, N., & Frohlich, M. (2002). "Case research in operations management", *International Journal of Operations & Production Management*, 22(2), 195-219, doi:org/10.1108/01443570210414329

Wang, S., Wan, J., Zhanng, D., Li D., & Chunhua Zhang. 2016. "Towards smart factory for industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination", *Computer Networks*, 101: 158-168, doi:org/10.1016/j.comnet.2015.12.017

Yin, Y., Stecke, K.E., & Li, D. (2018). "The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0", *International Journal of Production Research*, 56(1-2), 848-861, doi:org/10.1080/00207543.2017.1403664

Yin, R. (2009). "Case study research: Design and methods". *Sage, Los Angeles. Cal.*
https://books.google.com.br/books?id=FzawIAdilHkC&lpg=PR1&ots=l_3P-dmU-x&dq=Yin%20R.%202009.%20Case%20study%20research%3A%20Design%20and%20methods.%20Sage%20Los%20Angeles.%20Cal&lr&hl=pt-BR&pg=PR1#v=onepage&q&f=false

Zhou, W., Piramuthu, S., Chu, F. & Chu, C. (2017). "RFID-enabled flexible warehousing", *Decision Support Systems*, 98: 99-112, doi:org/10.1016/j.dss.2017.05.002

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de transformação digital na Indústria 4.0 é complexo e consome muitos recursos, sendo assim, é fundamental que seja conduzido por diretrizes estratégicas, para que a aplicação dos recursos estejam de fato alinhadas com as reais necessidades da empresa, principalmente, quando se trata de PMEs (Ghobakhloo et al., 2021). Tendo em vista a concorrência e o elevado nível de competitividade nos negócios, é premente que as empresas sejam cada vez mais efetivas em seus novos investimentos, uma vez que já não há espaço no mercado para empresas que cometam erros grosseiros.

4.1 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo contribuir no processo de adoção de soluções tecnológicas da I4.0, principalmente, quando consideradas as PMEs. Para atingir o objetivo geral, foram definidos três objetivos específicos, apresentados na forma de dois artigos científicos alinhados respectivamente, com os pré-requisitos da implantação de soluções tecnológicas, e o outro com o processo de gestão de implantação.

O primeiro e o segundo objetivos específicos buscam estabelecer os conceitos e caracterizar a I4.0, assim como as quatro dimensões de aplicações tecnológicas (*tecnologias front-end*) utilizadas como fundamentos para a construção das propostas apresentadas. Ambos os conceitos foram aplicados aos dois artigos, contudo no primeiro artigo buscou-se identificar pesquisas com aplicação das tecnologias *Front-end* especificamente em PMEs.

No primeiro artigo, o terceiro objetivo específico contempla a identificação de quais pré-requisitos, práticas, tecnologias e observações específicas foram consideradas antes, durante e depois da implantação de soluções tecnológicas. Já no segundo artigo, o terceiro objetivo específico focou a dinâmica, em que foi conduzido o processo de gestão de implantação, com seus acertos e lacunas.

O quarto e último objetivo específico consistia em realizar a estruturação, análise e apresentação da proposta de trabalho de forma sistêmica e holística, iniciando no nível estratégico da empresa e desdobrando gradativamente, até o nível operacional, utilizando, para tanto a Teoria das Restrições para fundamentação desta análise. Esta técnica foi utilizada nos dois artigos, tendo em vista o alto nível de correlação entre ambos indo além, pois juntou a Teoria das Restrições e dimensões *Front-end* de aplicação tecnológica em uma única ferramenta de análise, para a implantação de I4.0, mesmo que os dois artigos tenham abordagens distintas.

O artigo 1 procura identificar os aspectos relevantes a serem considerados no processo de implantação de soluções tecnológicas da I4.0 para PMEs. Neste sentido, e tendo em vista as singularidades das PMEs, apresenta um *roadmap* com uma análise bem detalhada, considerando os objetivos estratégicos, infraestrutura (nível de prontidão), pré-requisitos relevantes, seleção das tecnologias e sugerindo as primeiras ações, assim como boas práticas de gestão e autoavaliação. No que tange ao nível de maturidade, para a implantação de soluções tecnológicas, o artigo 1 apresenta o detalhamento descrito anteriormente, iniciando por empresas que não disponham de nenhum dos pré-requisitos mínimos de infraestrutura (nível

0), até o primeiro nível do modelo de maturidade Acatech, a visibilidade.

Já o artigo 2 apresenta uma análise mais generalista do processo de implantação de soluções tecnológicas da I4.0, não focando em nenhum segmento ou porte específico de empresa. O artigo apresenta um *roadmap* com o passo a passo, para estruturar o processo de gestão de implantação de soluções tecnológicas da I4.0. Além deste *roadmap*, apresenta quatro *frameworks*, um para cada dimensão *front-end*, com todos os mesmos elementos já citados do artigo 1, porém os detalha por níveis de maturidade próprios, sendo: para a *Smart Manufacturing* os níveis, 0 – Estruturação, 1 – Informatização, 2 – Integração, 3 – Visibilidade, 4 – Transparência, 5 – Simulação, 6 – Autonomia; para o *Smart Product & Service System* cinco níveis (0 – 4); para a *Smart Supply Chain* cinco níveis (0 – 4); e para o *Smart Working* são quatro níveis de maturidade (0 – 3).

Destarte, pode-se afirmar que todos os objetivos do presente trabalho foram atingidos, observando suas motivações, justificativas, aplicação prática e resultados obtidos. As ferramentas disponibilizadas em ambos os artigos apresentam um passo a passo, para que gestores de projetos tenham condições de planejar o processo de implantação de I4.0 de forma customizada, alinhando os objetivos da empresa, tecnologias disponíveis e singularidades da organização.

4.2 Sugestões de trabalhos futuros

Visando complementar o trabalho desenvolvido nesta dissertação, sugere-se considerar os seguintes trabalhos futuros:

- a) Ampliar o espaço amostral, inferindo também com análises quantitativas dos casos estudados, incluindo na amostra alguns casos que possam ser considerados como marco zero com empresas, que, ainda não tenham iniciado o processo de transformação digital, melhorando desta forma a possibilidade de cruzamento de dados e informações;
- b) Há uma dificuldade decorrente da integração de novas soluções tecnológicas, tendo em vista a falta de padrões básicos, que deveriam ser considerados, durante o desenvolvimento das mesmas. Sendo assim, estudos futuros que contribuam para definir como seria possível eleger atributos básicos comuns, que teriam, entre outros objetivos, facilitar o processo de integração, seria de grande valor.

5. APÊNDICES

5.1 Apêndice A - Formulário de consulta preliminar de qualificação da empresa e entrevistados

CONSULTA PRELIMINAR PARA AGENDAMENTO DE ENTREVISTA

Agradecemos por sua participação em nossa pesquisa. Gentileza informar no questionário abaixo seus dados de contato, bem como outras informações relevantes para darmos continuidade ao “agendamento da entrevista estruturada”.

Obs.: Nas questões objetivas podem ser sinalizadas mais de uma resposta.

DADOS DA EMPRESA

| | |
|---|--|
| Nome | |
| Segmento de atuação | |
| Nº Funcionários | |
| Endereço ou <i>web site</i> | |
| Telefone de contato | |
| Quando (data aproximada) que a empresa iniciou a jornada de transformação digital | |

Quanto ao porte sua empresa é:

| | |
|--|---|
| | Pequena: faturamento anual entre R\$ 360.000,00 – R\$ 4.800.000,00 |
| | Média: faturamento anual é superior a R\$ 4.800.000,00 e inferior a R\$ 25.000.000,00 |
| | Grande: faturamento anual é superior a R\$ 25.000.000,00 |

Assinale quais das tecnologias abaixo já foram e/ou estão em implantação em sua empresa:

| | |
|--|-----------------------------|
| | Computação em nuvem |
| | <i>Big data / analytics</i> |
| | Inteligência artificial |
| | IoT (Internet da coisas) |

| |
|--|
| Realidade aumentada |
| Realidade virtual |
| Manufatura aditiva / impressão 3D |
| CLPs – Controle Lógico Programável |
| Sensores, atuadores e RIFD |
| Simulação e Modelagem |
| Gêmeos digitais |
| WMS – Sistema de gerenciamento de armazéns |
| Robótica avançada, robôs colaborativos, robôs autônomos, AGV's |
| Sistemas de supervisão e aquisição de dados (SCADA) |
| Sistema de controle da execução de fabricação (MES) |
| Planejamento avançado da produção (APS) |
| Sistema ERP (Planejamento dos Recursos da Empresa) |
| Computação visual (<i>Machine vision</i>) |
| Outras tecnologias - especifique → |
| Outras tecnologias - especifique → |
| Outras tecnologias - especifique → |
| Outras tecnologias - especifique → |
| Outras tecnologias - especifique → |

DADOS DO ENTREVISTADO

| | |
|---------------------|--|
| Nome | |
| Cargo na empresa | |
| E-mail contato | |
| Telefone de contato | |
| Formação | |

De que forma você participou dos processos decisórios e/ou implantação destas tecnologias na empresa em questão?

| |
|----------------------------------|
| Sim dos processos decisórios |
| Sim dos processos de implantação |

| | |
|--|---|
| | Sim de ambos |
| | Sim participei como especialista (consultor, fornecedor de tecnologia e/ou pesquisador) |
| | Não participei em nenhuma das situações |

Qual foi ou ainda é o seu papel no processo de transformação digital da sua empresa?

| | |
|---------------------|---|
| | Técnico e/ou engenheiro de implantação |
| | Gestor responsável pela implantação |
| | Proprietário / diretor da empresa |
| | Especialista, ainda atuando |
| | Especialista, já sem atuação (consultor, fornecedor de tecnologia e/ou pesquisador) |
| Outro → especifique | |

Nota 01: todas as entrevistas serão aplicadas em ambiente virtual e com agendamento.

Nota 02: todas as entrevistas serão gravadas para que posteriormente sejam transcritas e façam parte dos dados da pesquisa.

Nota 03: os questionamentos serão abertos, ou seja, o entrevistado ficará à vontade para responder como melhor lhe convier e tem um tempo estimado de 30 – 40 minutos.

Nota 04: o agendamento respeitará a disponibilidade de agenda do entrevistado.

No momento oportuno entraremos em contato para agendamento da entrevista.

Obrigado!

Leandro Kappes

(51) 99839-4128

leandro.kappes@yahoo.com.br

5.2 Apêndice B - Questionário orientador do Artigo 01 – Pré-requisitos para implantação da indústria 4.0 em pequenas e médias empresas (PME's).

Os questionamentos a seguir foram orientados para a coleta de dados visando subsidiar o Artigo 01:

- Você lembra quando, porque e por quem foi tomada a decisão pela adoção das soluções tecnológicas da I4.0?
- Como ocorreu este processo de análise do contexto, e que elementos foram considerados na tomada de decisão? (Se necessário orientar, quanto ao: mercado,

infraestrutura, *know how*, tecnologia de base, cultura organizacional, processos e outros aspectos)

- Por onde foi iniciado a implantação e qual o motivo desta escolha?
- Quais foram as primeiras tecnologias implantadas e porque as mesmas foram escolhidas? Há novas tecnologias em implantação?
- Tendo em vista a experiência vivida no processo de implantação, você consegue avaliar se sua empresa estava preparada para dar este passo?
- Se fosse definir uma nova solução tecnológica hoje com a experiência que já tens, faria escolhas diferentes? Consideraria aspectos que possam ter sido ignorados? Se sim, quais?

5.3 Apêndice C - Questionário orientador do Artigo 02 - Gestão de projetos de implantação de Indústria 4.0: *Roadmaps* para os quatro *smarts*

Os questionamentos a seguir foram orientados para a coleta de dados visando subsidiar o Artigo 02:

- Como a empresa se organizou para implantar as soluções tecnológicas da I4.0, teve suporte de algum especialista, outra empresa, consultor ou outra forma de ajuda, ou foi buscando conhecimento com a própria equipe?
- Durante a definição e implantação das soluções tecnológicas, havia um gestor e uma equipe definidas para dar o suporte necessário para a implementação?
- A definição de infraestrutura, *hardwares* e *softwares* foi assessorada por alguém?
- Houve uma análise dos processos atuais da empresa e uma projeção dos processos futuros?
- Como foram selecionados os potenciais fornecedores de produtos e/ou serviços implantados? Foram indicados por fornecedores, especialistas, por parceiros de negócio ou identificados pela própria empresa?
- Tendo em vista que usualmente os fornecedores de soluções tecnológicas se especializam em suas áreas, como a empresa procedeu para promover a integração das ações de implantação?

- Se você fosse o “gerente do projeto” de implantação das soluções tecnológicas da I4.0 hoje, você conduziria a implantação da mesma maneira que foi realizada, ou faria algo diferente? O que faria diferente?