

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU - FEB**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

JOÃO VICTOR ROJAS LUIZ

**SUPORTE POTENCIAL DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0**  
**ÀS ATIVIDADES DE PCP DA TEORIA DAS RESTRIÇÕES: UMA**  
**ABORDAGEM MULTICRITÉRIO**

BAURU

2021

JOÃO VICTOR ROJAS LUIZ

**SUPORTE POTENCIAL DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0  
ÀS ATIVIDADES DE PCP DA TEORIA DAS RESTRIÇÕES: UMA  
ABORDAGEM MULTICRITÉRIO**

*Tese de Doutorado, apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP como exigência parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.*

Orientador: Prof. Dr. Fernando Bernardi de Souza

BAURU

2021

L953s

Luiz, João Victor Rojas

Suporte potencial das tecnologias da Indústria 4.0 às atividades de PCP da Teoria das Restrições : uma abordagem multicritério / João Victor Rojas Luiz. -- Bauru, 2021

242 f.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),  
Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Fernando Bernardi de Souza

1. Tambor-Pulmão-Corda. 2. Indústria 4.0. 3. Teoria das Restrições.  
4. Best-Worst Method. 5. TOPSIS. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE JOÃO VICTOR ROJAS LUIZ, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 13 dias do mês de setembro do ano de 2021, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de JOÃO VICTOR ROJAS LUIZ, intitulada **Suporte potencial das tecnologias da Indústria 4.0 às atividades de PCP da Teoria das Restrições: uma abordagem multicritério**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. FERNANDO BERNARDI DE SOUZA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. GLADYS DOROTEA CACSIRE BARRIGA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. JOSE DE SOUZA RODRIGUES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. MOACIR GODINHO FILHO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Universidade Federal de São Carlos, Prof. Dr. DANIEL PACHECO LACERDA (Participação Virtual) do(a) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas / Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO \_ \_ \_ \_ \_ . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. FERNANDO BERNARDI DE SOUZA



Aos meus queridos pais, Euclides e Isabel.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, por todo o suporte e carinho que me forneceram ao longo de todos esses anos:

Aos meus pais, Euclides e Maria Isabel, pelo exemplo de honestidade, prudência e disciplina, sem nunca perder a perseverança e o bom humor. Dedico este trabalho a vocês.

Ao meu irmão, Octaviano, meu maior exemplo de educação, respeito e paixão por aprender. Seu suporte e parceria foram fundamentais para o sucesso desta pesquisa.

À minha irmã, Francine, pelo apoio e ensinamentos fundamentais que me cedeu durante todos esses anos, sempre com alegria e motivação, e por jamais duvidar do meu potencial.

Ao professor e amigo Prof. Dr. Fernando Bernardi de Souza, pela orientação cuidadosa e de excelência, por conduzir meus primeiros passos na carreira acadêmica pela Iniciação Científica e pelas conversas e discussões acerca da nossa área, a Engenharia de Produção.

Aos Profs. Daniel Pacheco Lacerda, Moacir Godinho Filho, Gladys Dorotea Cacsire Barriga e José de Souza Rodrigues, pela leitura atenta e contribuições valiosas ao trabalho na Defesa. Agradeço também o Prof. José Alcides Gobbo Junior, pelas contribuições na banca de Qualificação.

A todos os especialistas respondentes desta pesquisa.

À CAPES, pela bolsa de Doutorado a mim concedida e à Univesp pela bolsa de estudos, atuando como Facilitador.

A todos os colegas e professores do PPGEF e funcionários da FEB/Unesp, principalmente os da Seção de Pós-Graduação. Agradecimentos especiais aos colegas Julio, Hugo, Carlos Cottas, Lucas, Ilton, Paula e Humberto.

## EPÍGRAFE

*Se toda a humanidade menos um fosse da  
mesma opinião, e apenas um indivíduo  
fosse de opinião contrária, a humanidade  
não teria maior direito de silenciar essa  
pessoa do que esta o teria, se pudesse, de  
silenciar a humanidade*

*(John Stuart Mill).*

## RESUMO

Atualmente, a manufatura experimenta um acentuado processo de desenvolvimento tecnológico digital, único pela presença de soluções de automação cognitivas, com alta independência da ação humana. Mudanças nos métodos de planejamento e controle da produção (PCP) são esperadas com o aparecimento de sistemas ciberfísicos e soluções baseadas em *big data* e *Internet das Coisas*. Neste contexto, a Teoria das Restrições (*Theory of Constraints* ou TOC) pode encontrar, nas novas tecnologias, suporte à sua abordagem para PCP, resumida nos métodos Tambor-Pulmão-Corda (TPC) e Gerenciamento de Pulmão (GP). Nesse contexto, a tese aqui apresentada visa identificar e avaliar o nível de suporte potencial das tecnologias representativas da Indústria 4.0 às atividades dos métodos TPC e GP. Para isso, utilizou-se uma abordagem multicritério, com a integração dos métodos BWM e TOPSIS, para compilar a opinião de especialistas. Alguns destes especialistas participaram de uma etapa complementar, qualitativa, da pesquisa. Esta tese propõe uma hierarquia das tecnologias em termos de seu nível de suporte. As tecnologias com maior destaque foram os sistemas inteligentes de controle da produção, aprendizagem de máquina e inteligência artificial e *big data e data analytics*. Dispositivos móveis, robótica e automação avançada e sistemas integrados de projeto e manufatura receberam o menor nível de suporte potencial. Também foi possível propor uma hierarquia das atividades do TPC e GP e discutir o papel geral da adoção tecnológica para a TOC.

Palavras-chave: Quarta Revolução Industrial; Tambor-Pulmão-Corda; tomada de decisão multicritério; *Best-Worst Method*; TOPSIS.



## **ABSTRACT**

Nowadays, manufacturing is experiencing an accentuated process of digital technological development, unique for the presence of cognitive automation solutions, with high independence from human action. Changes in production planning and control (PPC) methods are expected with the emergence of cyberphysical systems and solutions based on big data and the Internet of Things. In this context, the Theory of Constraints (TOC) can find, in new technologies, support for its approach to PPC, summarized in the Drum-Buffer-Rope (DBR) and Buffer Management (BM) methods. In this context, the thesis presented here aims to evaluate the level of potential support of the representative technologies of Industry 4.0 to the activities of the DBR and BM methods. For this, a multiple criteria approach was used, with the integration of BWM and TOPSIS methods, to compile the experts' opinion. Some experts participated in a complementary, qualitative stage of the research. This thesis proposes a hierarchy of technologies in terms of their level of support. The most prominent technologies were intelligent production control systems, machine learning and artificial intelligence, and big data and data analytics. Mobile devices, robotics and advanced automation, and integrated design and manufacturing systems received the lowest level of potential support. It was also possible to propose a hierarchy of DBR and BM activities and discuss the general role of technology adoption for TOC.

**Keywords:** Fourth Industrial Revolution; Drum-Buffer-Rope; multiple criteria decision making; Best-Worst Method; TOPSIS.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - <i>Framework</i> da fábrica inteligente no contexto da Indústria 4.0.....	32
Figura 2 - Contínuo entre ambiente real e realidade virtual.....	44
Figura 3 - <i>Framework</i> de arquitetura para IoT.....	46
Figura 4 - Arquiteturas de computação e manufatura em nuvem.....	49
Figura 5 - Relações entre as técnicas de produção enxuta e as tecnologias da Indústria 4.0.....	57
Figura 6 - Soluções de <i>Lean Automation</i> para integração em estação de trabalho encapsulada em CPS.....	59
Figura 7 - Aplicação de <i>big data</i> para suporte à tomada de decisão na gestão de cadeias de suprimento.....	64
Figura 8 - <i>Framework</i> integrado da TOC.....	69
Figura 9 - Probabilidades de conclusão de ordens por região do <i>status</i> do pulmão.....	77
Figura 10 - TPC clássico para sistema com restrição de mercado.....	79
Figura 11 - TPC clássico para sistema com restrição de capacidade.....	79
Figura 12 - TPC clássico para sistema com restrição de capacidade.....	79
Figura 13 - <i>Framework</i> de integração dos princípios da TOC, tomada de decisão sob incerteza e o ambiente da Indústria 4.0.....	94
Figura 14 - <i>Framework</i> PRISMA.....	103
Figura 15 - <i>Framework</i> de integração de TOC e Indústria 4.0.....	115
Figura 16 - Fluxograma das etapas do método de pesquisa.....	119
Figura 17 - Resolução do BWM para três critérios.....	124
Figura 18 - <i>Boxplot</i> do peso médio para as atividades de TPC/GP.....	139
Figura 19 - <i>Mean plot</i> do peso médio para as atividades de TPC/GP com intervalos de confiança de 95%.....	139
Figura 20 - Gráfico de resíduos x valor médio para checagem da homogeneidade das variâncias dos peso.....	140
Figura 21 - Gráfico Q-Q dos resíduos para os pesos médios para checagem da normalidade.....	141
Figura 22 - Níveis de priorização das atividades de TPC e GP.....	145
Figura 23 - <i>Boxplot</i> da variável “ <i>score</i> ” para as tecnologias da Indústria 4.0.....	155
Figura 24 - <i>Mean plot</i> da variável “ <i>score</i> ” com intervalos de confiança de 95%.....	156

Figura 25 - Gráfico de resíduos x valor médio para checagem da homogeneidade das variâncias dos <i>scores</i> .....	157
Figura 26 - Gráfico Q-Q dos resíduos para os <i>scores</i> médios para checagem da normalidade .....	157
Figura 27 - Tecnologias da Indústria 4.0 por nível potencial de suporte para atividades do TPC e GP.....	159

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Grupos tecnológicos da Indústria 4.0 pela análise de <i>frameworks</i> teóricos .	35
Quadro 2 - Tecnologias da Indústria 4.0 estudadas na presente pesquisa .....	41
Quadro 3 - Atividades do TPC/GP estudadas na presente pesquisa.....	73
Quadro 4 - Termos de pesquisa aplicados na coleta.....	104
Quadro 5 - Amostra de artigos analisados na revisão sistemática.....	107
Quadro 6 - Escala de Saaty para comparações pareadas.....	121
Quadro 7 - Hierarquia de atividades e tecnologias para o método BWM-TOPSIS .....	132
Quadro 8 - Resultados previstos na literatura com relação à avaliação das atividades do TPC/GP .....	152
Quadro 9 - Resultados inesperados sobre a avaliação das atividades do TPC/GP e possíveis explicações .....	153
Quadro 10 - Resultados previstos na literatura com relação ao suporte das tecnologias da Indústria 4.0 às atividades do TPC.....	168
Quadro 11 - Resultados inesperados sobre o suporte potencial das tecnologias da Indústria 4.0 às atividades do TPC .....	169
Quadro 12 - Resultados previstos na literatura com relação às opiniões emitidas pelos especialistas na etapa qualitativa .....	184
Quadro 13 - Resultados inesperados, provenientes das opiniões emitidas pelos especialistas na etapa qualitativa .....	185

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Índice de consistência (IC) .....	123
Tabela 2 - Perfil dos respondentes do levantamento tipo <i>survey</i> .....	137
Tabela 3 - Ranking de importância das atividades de TPC/GP, por peso médio .....	137
Tabela 4 - Resultados do teste de Conover-Iman para comparações pareadas entre pesos médios de atividade.....	143
Tabela 5 - Agrupamento das atividades de TPC e GP por nível de priorização, aplicando o algoritmo compact letter display.....	144
Tabela 6 - Ranking pelo <i>score</i> médio das tecnologias da Indústria 4.0 relativo ao nível de suporte potencial às atividades de PCP da TOC .....	154
Tabela 7 - Resultados do teste de Conover-Iman para comparações pareadas entre <i>scores</i> médios de tecnologia da Indústria 4.0.....	158
Tabela 8 - Agrupamento das tecnologias da Indústria 4.0 por nível de suporte, aplicando o algoritmo <i>compact letter display</i> .....	158

## ÍNDICE DE SIGLAS

AGV - Automated guided vehicle  
AHP - Analytical Hierarchy Process  
ANOVA - Análise de Variância  
BI - Business Intelligence  
BM - Buffer Management  
BWM - Best-Worst Method  
CAD - Computer-aided design  
CAE - Computer-aided engineering  
CAM - Computer-aided manufacturing  
CAT - Computer-aided TOC  
CCPM - Critical Chain Project Management  
CP - Carga Planejada  
CPS - Cyber-physical system  
DBR - Drum-Buffer-Rope  
ERP - Enterprise Resource Planning  
ETO - Engineering-to-Order  
FoT - Factory of Things  
FRT - Future Reality Tree  
GP - Gerenciamento de Pulmão  
GPS - Global positioning system  
HMI - Human-Machine Interface  
IoT - Internet of Things  
JIT - Just in Time  
KPI - Key Performance Indicator  
M2M - Machine to machine  
MES - Manufacturing Execution System  
MRP - Material Requirement Planning  
MRP II - Manufacturing Resource Planning  
MTA - Make-to-availability  
MTO - Make-to-order  
MTS - Make-to-stock  
NA - Nível Alvo  
OEE - Overall Equipment Effectiveness  
OPT - Optimized Production Technology  
PCP – Planejamento e Controle da Produção  
PE - Pulmão de Expedição  
PLM - Product lifecycle management  
PM - Pulmão de Montagem  
POOGI - Process of ongoing improvement)  
PP - Pulmão de Produção  
PR - Pulmão de Restrição  
QR - Quick response  
RA - Realidade Aumentada  
RFID - Radio frequency identification  
RRC - Recurso com restrição de capacidade

RV - Realidade Virtual  
SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition  
SMED - Single Minute Exchange of Dies  
STP – Sistema Toyota de Produção  
TA - Throughput Accounting  
TI - Tecnologia da Informação  
TOC - Theory of Constraints  
TOPSIS - Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution  
TP - Thinking Processes  
TPC - Tambor-Pulmão-Corda  
TPC-S - Tambor-Pulmão-Corda Simplificado  
TPM - Total Productive Maintenance  
VSM - Value Stream Mapping  
VUCA - Volatility, Uncertainty, Complexity, Ambiguity  
WIP - Work in process  
XaaS - Everything as a service

# SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
ÍNDICE DE FIGURAS .....	9
ÍNDICE DE QUADROS.....	11
ÍNDICE DE TABELAS .....	12
ÍNDICE DE SIGLAS .....	13
SUMÁRIO .....	15
1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO DO TRABALHO.....	17
1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA, OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS.....	21
1.3. DELIMITAÇÃO DO ESCOPO DA PESQUISA .....	25
1.4. JUSTIFICATIVAS E RELEVÂNCIA DA PESQUISA .....	27
1.5. ESTRUTURA DA TESE.....	30
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	31
2.1. TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 E GESTÃO DE OPERAÇÕES .....	31
2.1.1. <i>A Indústria 4.0 e as suas tecnologias emergentes.....</i>	32
2.2. FUNDAMENTOS DA TEORIA DAS RESTRIÇÕES E APLICAÇÃO PARA PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO	67
2.2.1. <i>Origem e princípios básicos da TOC.....</i>	67
2.2.2. <i>Tambor-Pulmão-Corda e Gerenciamento do Pulmão.....</i>	72
2.2.3. <i>Adoção de tecnologias na perspectiva da TOC.....</i>	84
2.2.3.1. As seis questões tecnológicas da TOC.....	95
3. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA EM INDÚSTRIA 4.0 E TOC.....	102
3.1. MÉTODO DE PESQUISA PARA A REVISÃO SISTEMÁTICA .....	102
3.2. RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA.....	106
3.3. DISCUSSÃO.....	110
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	118
4.1. PROBLEMAS DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO .....	119
4.1.1. <i>Best-Worst Method (BWM).....</i>	120
4.1.1.1. Agregando respostas do BWM .....	124
4.1.2. <i>TOPSIS.....</i>	127
4.1.3. <i>Definição dos construtos e elaboração e envio do questionário .....</i>	130
4.2. ETAPA QUALITATIVA .....	134
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	136



5.1.	ETAPA QUANTITATIVA.....	136
5.1.1.	<i>Importância das atividades dos sistemas TPC e GP – aplicação do método Best-Worst-Method (BWM)</i> .....	137
5.1.2.	<i>Suporte das tecnologias da Indústria 4.0 às atividades dos sistemas TPC e GP – aplicação do método TOPSIS</i> .....	153
5.2.	ETAPA QUALITATIVA .....	170
6.	CONCLUSÕES.....	187
6.1.	ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS DE PESQUISA .....	187
6.2.	CONTRIBUIÇÕES TEÓRICAS .....	188
6.3.	CONTRIBUIÇÕES GERENCIAIS .....	191
6.4.	LIMITAÇÕES DA PESQUISA, LACUNAS DE ESTUDO E PROPOSTA DE AGENDA DE PESQUISA .....	193
	REFERÊNCIAS.....	195
	APÊNDICE A – QUADRO DE ANÁLISE DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE INDÚSTRIA 4.0 E TOC .....	215
	APÊNDICE B - <i>SCRIPT</i> PARA ANÁLISE DE VARIÂNCIA E TESTES DE HIPÓTESES PARA RESULTADOS DO ESTÁGIO BWM .....	229
	APÊNDICE C - <i>SCRIPT</i> EM R PARA ESTÁGIO TOPSIS DO MÉTODO DE PESQUISA .....	231
	APÊNDICE D - <i>SCRIPT</i> PARA ANÁLISE DE VARIÂNCIA E TESTES DE HIPÓTESES PARA RESULTADOS DO ESTÁGIO TOPSIS .....	232
	APÊNDICE E - QUESTIONÁRIO DA ETAPA BWM-TOPSIS .....	234
	APÊNDICE F - QUESTIONÁRIO DA ETAPA QUALITATIVA.....	240

## **1. INTRODUÇÃO**

A seção introdutória é estruturada em cinco seções. O capítulo se inicia com uma breve contextualização sobre as revoluções tecnológicas e seu papel nas atividades de gestão de operações (1.1.). Em seguida, o problema de pesquisa é formulado, o que culmina nos objetivos deste trabalho (1.2.). Já a seção 1.3. trata da delimitação do escopo da presente pesquisa. Em seguida, apresentam-se as principais justificativas e contribuições do trabalho (1.4.). Por fim, a estrutura das seções do trabalho é detalhada (1.5.).

### **1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO DO TRABALHO**

Atualmente, a manufatura experimenta um acentuado processo de desenvolvimento tecnológico digital, único pela presença de soluções de automação cognitiva, com alta independência da ação humana. A Inteligência Artificial (IA), robótica avançada e tecnologia de sensores têm o potencial de aumentar a autonomia e acelerar a individualização e a flexibilidade da produção. Por causar mudanças drásticas na forma de se produzir e, por consequência, na maneira de se gerenciar as operações, este fenômeno ganhou o nome de Quarta Revolução Industrial ou, como se popularizou, Indústria 4.0 (XU; XU; LI, 2018). Claramente, esse não é o primeiro salto tecnológico com impactos na manufatura e nos sistemas de gestão associados. De forma a compreender a necessidade de se investigar a interação entre as novas tecnologias derivadas da Indústria 4.0 e a maneira como a manufatura é gerenciada, é necessário revisitar a evolução dos sistemas produtivos e dos processos de gerenciamento que o acompanharam.

Durante séculos, bens, incluindo alimentos, roupas e mesmo habitações foram fabricados à mão ou com a ajuda de animais de trabalho. A primeira etapa de transformação na maneira de se produzir se iniciou entre os séculos XVIII e XIX, em que as atividades humanas mudaram definitivamente o foco da agricultura para a manufatura. Máquinas movidas à água e vapor foram desenvolvidas para ajudar os trabalhadores. Esse período marca a Primeira Revolução Industrial (ŚLUSARCZYK, 2018). Nessa época, a alta demanda por produtos industrializados levou as novas indústrias a tomarem medidas para aumentar o volume de produção. As dificuldades de

oferta só foram sanadas com o advento da produção em massa no início do século XX (YIN; STECKE; LI, 2018).

Com desenvolvimentos na indústria siderúrgica, metalúrgica e química e com o uso de eletricidade, a produção industrial ganhou novo impulso. Esse período que abrange a passagem do século XIX para o XX compreende a Segunda Revolução Industrial. Nesse período, Henry Ford desenvolveu a sua linha de montagem para o Modelo T, atingindo grandes volumes de produção, evoluindo para os primeiros sistemas de produção em massa, a baixo custo. Esses sistemas incluíam uma linha de montagem dedicada a um único modelo de produto, padronização de componentes e operações, especialização de trabalhadores e equipamentos, tempos curtos de operação e a tentativa de equilibrar as cargas de trabalho entre estações de trabalho. Nessa mesma época, Frederick Taylor estabeleceu a Administração como Ciência. O Taylorismo baseou o Fordismo, por exemplo, no estudo científico do trabalho e na decomposição dos processos, ditada por medições técnicas resultantes da Administração Científica e não por tradição ou experiência. Destaca-se que o salto da Primeira para a Segunda Revolução acompanhou a criação dos primeiros sistemas de gestão e a visão corrente de organização industrial. A partir de Taylor e Ford, decisões operacionais ganharam importância (WANG et al., 2017).

A partir da década de 1920, as demandas dos clientes estavam se tornando mais diversificadas. Um único modelo (Ford T preto) não satisfazia mais a todos os clientes. Avanços na recém-desenvolvida gestão de operações, no sentido de conciliar o objetivo de volume com as novas exigências de variedade de produção, foram alcançados pela japonesa Toyota. O Sistema Toyota de Produção (STP), desenvolvido por Taiichi Ohno, é precursor da manufatura enxuta ou *lean manufacturing*. O STP é um sistema de produção integrado, que gera produtos a fim de satisfazer requisitos de volume e variedade simultaneamente, com mínimo desperdício de recursos (LANDER; LIKER, 2014). Outras inovações na manufatura dessa época, voltadas à produção com variedade, são os sistemas de produção *job shop* (manufatura de lotes pequenos, com alta variedade, com maquinário disposto em arranjo funcional) e a manufatura celular (processamento de cada família de peças dentro de um grupo de máquinas, com mínimo movimento intercelular das peças) (YIN; STECKE; LI, 2018).

Nas últimas décadas do século XX, a invenção e a fabricação de dispositivos eletrônicos, como o transistor e, posteriormente, circuitos integrados, possibilitaram a automação mais completa de máquinas individuais para suplementar ou substituir os

operadores. Este período também gerou o desenvolvimento de sistemas de *software* para tirar proveito do *hardware* eletrônico. A partir desses desenvolvimentos, no início dos anos 1970, a automação alcançou a produção (ROJKO, 2017). Satisfazer as crescentes demandas dos consumidores por uma maior variedade de produtos de alta qualidade começou a se tornar realidade graças à implantação das tecnologias citadas, culminando na Terceira Revolução Industrial (XU; XU; LI, 2018). O incremento da complexidade do ambiente de manufatura, com portfólios de produto variados e com estrutura intrincada, criou a necessidade de sistemas capazes de integrar dados de diversos setores, de forma a melhorar a disponibilidade dos materiais necessários para produção, no tempo e quantidade adequados. Sistemas integrados, como o planejamento das necessidades de materiais (*Material Requirement Planning* - MRP), foram criados nas décadas de 1960 e 1970 para elaboração de planos de produção e controle de inventário (BENTON; SHIN, 1998; KRAJEWSKI et al., 1987), progredindo para os sistemas integrados de gestão empresarial (*Enterprise Resource Planning* - ERPs) que permitiram o planejamento, programação e rastreamento dos fluxos de produtos dentro da fábrica (MCGAUGHEY; GUNASEKARAN, 2007; PORTER et al., 1999). As tecnologias da informação aplicadas à gestão das operações permitiram melhor atendimento ao cliente, programação da produção e redução dos custos de fabricação (STEVENSON; HENDRY; KINGSMAN, 2005).

Também com foco na garantia de entrega confiável e rápida com baixos custos, na década de 1980 houve a introdução da Teoria das Restrições (ou do inglês *Theory of Constraints* – TOC), pelo físico israelense Eliyahu M. Goldratt. A TOC foi concebida no sentido de integrar e aplicar conceitos consolidados das Ciências Naturais na gestão das organizações. O marco inicial da TOC foi o desenvolvimento do *software* de programação da produção denominado OPT (inicialmente *Optimized Production Timetables* e mais tarde sob o nome comercial *Optimized Production Technology*), que se diferia dos sistemas MRP por considerar as limitações de capacidade produtiva no planejamento da produção (BHARDWAJ; GUPTA; KANDA, 2010). Para a TOC, as restrições determinam o desempenho de um sistema e como há poucas restrições em qualquer sistema, o gerenciamento desses poucos pontos permite o controle efetivo de todo o sistema. Baseado no conceito de restrição e focalização, Goldratt desenvolveu uma metodologia de Planejamento e Controle da Produção (PCP) chamada Tambor-Pulmão-Corda ou TPC (*Drum-Buffer-Rope* - DBR) (WATSON; BLACKSTONE; GARDINER, 2007). Para execução dos planejamento elaborado no TPC, a TOC propõe

o gerenciamento de pulmões ou GP (*Buffer Management* – BM), que usa o consumo do pulmão para direcionar prioridades e intervenções gerenciais (BLACKSTONE, 2010).

Ainda nos anos 80, foram desenvolvidos os primeiros sistemas de supervisão e aquisição de dados ou de interface humano-máquina (conhecidos pelo acrônimo em inglês SCADA/HMI (*Supervisory Control And Data Acquisition/Human-Machine Interface*) (POWER; BAHRI, 2005). Um exemplo de sistema supervisório é o sistema de execução de manufatura ou, do inglês, *Manufacturing Execution System* – MES. Nesse período, percebia-se que os sistemas ERP não eram ideais para o gerenciamento de chão de fábrica, pois, nestes sistemas, dados dos processos são registrados e reportados semanalmente, mensalmente ou diariamente, enquanto o gerenciamento de curtíssimo prazo requeria registro e disponibilidade das informações em tempo real. Essa incapacidade nos sistemas ERP/MRP abriu o caminho para aplicativos de *software* de coleta de dados em tempo real, que se tornaram o que hoje são conhecidos como MES. Estes programas permitiam a vinculação de sensores aos sistemas computadorizados. Os sensores monitoram dados do processo e os fornecem para o sistema, que os analisa, armazenam e reportam para controle do usuário (COTTYN et al., 2011; SAENZ DE UGARTE; RTIBA; PELLERIN, 2009). Esses sistemas avançados de coleta e análise de dados são embriões das tecnologias distintivas da Quarta Revolução Industrial.

Tomando elementos da revolução anterior, a Indústria 4.0 adota computadores e automação, mas os aprimora, com sistemas autônomos e inteligentes alimentados por dados e aprendizado de máquina (*machine learning*) (LIAO et al., 2018; XU; XU; LI, 2018). Por exemplo, o uso de sistemas supervisórios é ampliado com a introdução da tecnologia de *internet* das coisas (*Internet of Things* ou IoT), adotando-se técnicas avançadas de manufatura e permitindo que os sistemas compartilhem informações, as analisem e as apliquem para guiar ações de maneira inteligente e autônoma (EHRET; WIRTZ; EHRET, 2016). Além da IoT, a Indústria 4.0 incorpora tecnologias de ponta, como a manufatura aditiva, robótica, *big data*, computação em nuvem, inteligência artificial e realidade aumentada (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Alguns dos primeiros programas desenvolvidos durante os últimos estágios do século XX, como os sistemas supervisórios, o controle de chão de fábrica e o gerenciamento do ciclo de vida do produto, eram conceitos que careciam da tecnologia necessária para viabilizar sua completa implementação e têm na Indústria 4.0 a possibilidade de atingir seu pleno potencial (ALMADA-LOBO, 2016).

Com algumas tecnologias da Indústria 4.0, como a computação em nuvem e sistemas físicos ciberfísicos possibilitados pela IoT, uma cadeia de suprimentos pode se tornar mais flexível e transparente (BIENHAUS; HADDUD, 2018; DOLGUI et al., 2018; VENDRELL-HERRERO et al., 2017). Conexões entre pessoas, objetos e sistemas formam redes dinâmicas e auto-organizadas, gerenciadas em tempo real, o que promove mais autonomia aos sistemas de produção. As competências de tomada de decisão podem ser transferidas de um sistema organizado e hierárquico para um sistema descentralizado, com decisões tomadas de maneira autônoma ou semiautônoma pela rede de máquinas, equipamentos, operadores e dispositivos móveis. Por outro lado, as atividades de PCP e gestão da cadeia de suprimentos podem enfrentar novos desafios. Maior volume de dados e disponibilidade em tempo real exigem novas infraestruturas e abordagens para lidar com informações (ŚLUSARCZYK, 2018; ZHENG et al., 2018). Nesse contexto, os sistemas de gerenciamento da produção podem ser diretamente impactados por essas novas tecnologias.

## **1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA, OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS**

A cada inovação tecnológica implantada no contexto de manufatura, novos sistemas de gestão ou adaptações aos existentes ocorrem. A mudança de paradigma tecnológico trazida pela Indústria 4.0 também apresenta o potencial de afetar as tomadas de decisões gerenciais. Essa mudança surge em um contexto empresarial turbulento, representado pelo “mundo VUCA” (acrônimo para *Volatility, Uncertainty, Complexity e Ambiguity*), ou seja, pela presença de alta volatilidade, incerteza, complexidade e ambiguidade (BENNETT; LEMOINE, 2014; KAIVO-OJA; LAURAEUS, 2018). Para Lee et al. (2014), essa evolução requer a utilização de ferramentas avançadas de previsão, de modo que os muitos dados gerados possam ser sistematicamente processados em informações que possam explicar as incertezas e, assim, tomar decisões mais informadas. Grande parte dessas ferramentas é derivada, por exemplo, da tecnologia de *big data* (DE CAMARGO FIORINI et al., 2018; GUNASEKARAN et al., 2018; OPRESNIK; TAISCH, 2015).

Pesquisas têm se atentado para os potenciais benefícios da digitalização e integração de tecnologias de inteligência artificial nas operações fabris, permitida pelas novas tecnologias, como ganhos financeiros pela redução de desperdícios e processos redundantes ou desnecessários (KADZIELSKI, 1989; VENDRELL-HERRERO et al.,

2017; ZHENG et al., 2018). Na gestão de operações, e na perspectiva da Indústria 4.0, capacidades analíticas aos sistemas de produção, podem permitir uma melhor análise dos padrões de demanda e flutuações, melhorando significativamente o PCP (FATORACHIAN; KAZEMI, 2020; ZHONG et al., 2017). São citados como benefícios para as atividades de PCP a aplicação de tecnologias como aprendizado de máquina (GONZÁLEZ RODRÍGUEZ; GONZALEZ-CAVA; MÉNDEZ PÉREZ, 2020; USUGA CADAVID et al., 2020), IoT e *big data* (OLUYISOLA; SGARBOSSA; STRANDHAGEN, 2020).

Recentemente, as pesquisas em modelos de gestão têm se voltado aos possíveis impactos das tecnologias atreladas ao fenômeno da Indústria 4.0, como um ambiente de maior acesso a dados e a esperada redução da incerteza. Por exemplo, há estudos iniciais sobre as potenciais implicações da Indústria 4.0 nas metodologias de gestão da produção como o *Lean Manufacturing* (BUER; STRANDHAGEN; CHAN, 2018; KOLBERG; KNOBLOCH; ZÜHLKE, 2017; KOLBERG; ZÜHLKE, 2015; TORTORELLA; FETTERMANN, 2017), o *Six Sigma* (ARCIDIACONO; PIERONI, 2018; GIANNETTI; RANSING, 2016; REIS, 2018) e a Teoria das Restrições (*Theory of Constraints – TOC*) (BALAJI et al., 2018; REDDY; TELUKDARIE, 2018; TSAI, 2018; TSAI; LAI, 2018; TSAI; LU, 2018). Porém, são incipientes os estudos que buscam avaliar de forma aprofundada o impacto da implantação das inovações na aplicação e mesmo na relevância de tais métodos.

Métodos e princípios da TOC já foram explorados, em maior ou menor grau, na literatura de diversos campos do conhecimento. Ikeziri et al. (2018), ao revisar a literatura em TOC e apresentar vias para pesquisas futuras, divide o corpo de conhecimentos do tema em seis áreas: Produção, Projetos, Contabilidade de Ganhos (*Throughput*), Processos de Raciocínio (*Thinking processes - TP*), Gestão da Cadeia de Suprimentos e Processo de Melhoria. A partir de pesquisas adicionais, realizadas com o objetivo de identificar como a pesquisa em TOC está associada a tópicos emergentes em gestão de operações, aplicando termos como “Indústria 4.0”, “Fábrica inteligente”, “Indústria inteligente”, “Manufatura inteligente”, “*Internet das Coisas*” e “Sistemas ciberfísicos”, nenhum trabalho foi encontrado.

Em particular, pesquisas sobre a interação entre as tecnologias da Indústria 4.0 e as atividades de PCP carecem de exploração (BENDUL; BLUNCK, 2019; PAGLIOSA; TORTORELLA; FERREIRA, 2019; ROSSIT; TOHMÉ; FRUTOS, 2019b). Sistemas como MRP, *Just in Time* (JIT) e TPC envolvem definição de planos e programas de

produção, gestão de estoques e decisões diversas, que vão desde a compra de matéria-prima e liberação de material ao chão de fábrica, até a ampliação de capacidade e definição de horas extras e subcontratação. Todas essas atividades podem receber suporte de tecnologias digitais (MOURTZIS; VLACHOU, 2018; ZANGIACOMI et al., 2020).

Estudos sobre a relação entre as práticas preconizadas pela TOC e a implantação de tecnologias não são recentes. Um ponto, ainda não relatado em publicações acadêmicas, é a perspectiva da TOC para adoção de novas tecnologias, expressa em livros (GOLDRATT; SCHRAGENHEIM; PTAK, 2000) e literatura cinzenta (GOLDRATT, 2006; SCHRAGENHEIM, 2017). Para Goldratt, apenas adotar uma nova tecnologia, com base na notoriedade conquistada em aplicações bem-sucedidas em outras empresas, não garante que haja melhoria no desempenho. Para que resultados efetivos possam ser alcançados com uma nova tecnologia, políticas gerenciais aplicadas até então para lidar com as limitações impostas pela tecnologia antiga necessitam ser reavaliadas e eventualmente substituídas por novas. A manutenção das regras pode levar à perpetuação de problemas antigos, pois decisões continuam sendo tomadas como se as limitações anteriores continuassem existindo. Assim, a abordagem da TOC visa avaliar se a adoção da tecnologia realmente traz benefícios reais, que não serão limitados por políticas ou regras restritivas da organização (GOLDRATT, 2002).

Para análise do potencial da tecnologia em causar benefícios efetivos, Goldratt apresenta seis questões tecnológicas que procuram avaliar o potencial impacto da implantação de uma tecnologia na redução de limitações reais à meta do sistema (COX et al., 2012). Portanto, é relevante avaliar como tecnologias disruptivas como as da Indústria 4.0 serão consideradas pela TOC, quando interagirem com suas práticas consolidadas há décadas.

Coman e Ronen (1995) trataram pioneiramente da relação entre TOC e tecnologia, elencando três modos de interação entre tecnologias da informação (TI) e a TOC:

- *IT-aiming* (aplicações de TI orientadas pela TOC): Restrições que obstruem a capacidade da organização de atingir seus objetivos gerais são os focos do investimento em TI. Isso inclui restrições na capacidade da organização de produzir informações oportunas para os tomadores de decisão, de comunicar informações sobre pedidos e de recuperar dados armazenados.



- *IT-constraints* (restrições de TI): Assim como os demais gerentes de nível tático, os executivos de TI devem aplicar os princípios da TOC para identificar as restrições da função TI. O departamento de TI típico mantém uma lista de pedidos aguardando para serem desenvolvidos. Esse atraso reflete a existência de gargalos no processo de desenvolvimento de aplicativos, por exemplo.
- TOC auxiliada por computador (*computer-aided TOC - CAT*): a tecnologia da informação deve ser aplicada para facilitar a utilização de técnicas de TOC na organização. O CAT inclui o monitoramento das taxas de utilização de recursos, programação computadorizada de recursos de acordo com o TPC, priorização de decisões de compra de acordo com a técnica de custo/utilização e simuladores computacionais treinando funcionários na aplicação dos princípios da TOC.

Neste trabalho, o foco é precisamente o CAT, pois se pretende identificar e avaliar o nível de suporte potencial das novas tecnologias derivadas da Indústria 4.0 na utilização de técnicas da TOC. Por exemplo, há indicação na literatura da aplicação de veículos autônomos para apoio à gestão de redes de suprimentos baseadas no TPC (RÜTTIMANN; STÖCKLI, 2020).

Evidencia-se, portanto, que o arcabouço teórico oferecido pela TOC, com suas técnicas e ferramentas, pode ser diretamente impactado pelo ambiente gerado pelas inovações tecnológicas recentes. Assim, a tese aqui apresentada procura responder à seguinte indagação: Quais tecnologias da Indústria 4.0 possuem maior potencial de suporte às atividades dos métodos TPC e GP?

Para se investigar a resposta a essa questão de pesquisa, há a dificuldade de se encontrar casos específicos de organizações que tenham implantado tecnologias ligadas à Indústria 4.0 (e não apenas as associadas à revolução anterior) e, ao mesmo tempo, apliquem de maneira abrangente práticas de TOC em suas operações. Além disso, nesta pesquisa, pretende-se explorar o potencial de aplicação, identificando grupos tecnológicos mais teoricamente adequados para apoiar cada atividade dos métodos TPC e GP, devendo ser priorizados em investimentos futuros. Métodos de tomada de decisão multicritério são indicados neste contexto, já que se pode contar com a avaliação de especialistas, que analisarão as alternativas de acordo com diferentes critérios de

avaliação para gerar uma classificação das tecnologias em estudo (MARDANI et al., 2015; STEWART, 1992).

Dessa forma, essa tese visa, como objetivo central, identificar e avaliar o nível de suporte potencial das tecnologias representativas da Indústria 4.0 às atividades dos métodos TPC e GP. Neste sentido, a Tese que se defende neste trabalho é que o método TPC pode ser potencializado se adequadamente suportado pelas tecnologias da Indústria 4.0. Os resultados da pesquisa desenvolvida permitiram identificar quais são as tecnologias que mais potencializariam os resultados do TPC e GP.

Importante destacar que não se propõe aqui indicar que certas tecnologias devam ser aplicadas no contexto do TPC e GP enquanto outras seriam desnecessárias. Objetiva-se estabelecer um *ranking* do grau de importância atribuído por especialistas às diferentes aplicações, sem desconsiderar as interdependências existentes entre as tecnologias estudadas. Pretende-se identificar as tecnologias que, caso estejam presentes e funcionem bem, permitiriam um melhor desempenho do sistema TPC/GP. A clusterização das aplicações aqui realizada pressupõe os aspectos integradores das tecnologias da Indústria 4.0. Desta forma, a relação de subordinação entre as tecnologias deve ser levada em consideração em sua aplicação efetiva, o que pode incluir tecnologias com baixa avaliação por parte dos participantes da presente pesquisa.

Como objetivo secundário, possível pela utilização de técnicas de avaliação multicritério, procurou-se avaliar a importância das próprias atividades de TPC e GP, verificando quais são as mais preponderantes em um sistema de produção governado pela TOC e cujo suporte tecnológico deve ser foco de atenção gerencial. O mesmo raciocínio apresentado no parágrafo anterior se aplica às atividades de TPC e GP, que também passaram por um processo de classificação e clusterização. Estas atividades possuem alto nível de integração, o que não impede a análise de suas contribuições individuais e possível priorização por parte da gestão.

### **1.3. DELIMITAÇÃO DO ESCOPO DA PESQUISA**

Este trabalho trata de temas muito amplos, trabalhados em diversas frentes na literatura. Por exemplo, uma pesquisa na base *Scopus* com os termos “*industry 4.0*” ou “*forth industrial revolution*”, realizada em janeiro de 2021, resultou em 13.216 documentos. Já aplicando os termos “*cyber-physical system*” e “*Internet of Things*”,

estritamente associados à Indústria 4.0, as pesquisas retornaram 17.144 e 92.018 publicações, respectivamente. Os trabalhos vão desde as áreas que desenvolveram essas tecnologias, como Computação e Engenharia de Automação, até as áreas em que são aplicadas, como a Engenharia de Fabricação, *Design* e Administração. Dentro do tópico de gestão, os trabalhos abordam gestão da produção, logística e cadeia de suprimentos, *Marketing*, inovação e desenvolvimento de produtos e sustentabilidade. Mesmo o tema Indústria 4.0 não está bem definido na literatura, englobando uma variedade de termos, como, além dos supracitados, fábricas inteligentes, *big data* e análise preditiva, inteligência artificial, computação em nuvem, manufatura aditiva e impressão 3D, realidade aumentada e virtual, veículos autônomos e muitos outros.

Da mesma forma, a literatura em TOC é diversa, envolvendo suas aplicações no planejamento e controle da produção, distribuição e cadeia de suprimentos, gestão de projetos, gestão da qualidade e melhoria contínua, contabilidade e mesmo discussões teóricas, sobre seus princípios e ferramentas lógicas, como os seus processos de raciocínio. Apesar de ter sido concebida originalmente para resolução de problemas industriais, a TOC, com o desenvolvimento dos processos de raciocínio, também tem sido aplicada fora do ambiente de manufatura, como nas áreas da saúde e educação (IKEZIRI et al., 2019).

Portanto, o estudo da mútua interação entre Indústria 4.0 e Teoria das Restrições poderia ser feito sob diferentes perspectivas, sendo necessário realizar um recorte temático que viabilize uma questão de pesquisa original e permita uma investigação aprofundada. Propõem-se, neste trabalho, dois recortes, que ajudarão a tornar o objeto de estudo mais específico.

Primeiramente, pretende-se analisar o impacto das tecnologias da indústria 4.0 para tomadas de decisão concernentes à área de manufatura e, mais especificamente, a métodos de gestão de operações. Sendo assim, outras aplicações como o uso em cidades inteligentes (*smart cities*) e para uso cotidiano e doméstico não serão tratados aqui. Como discutido na seção 1.1., a Indústria 4.0 apresenta reflexos nos sistemas de gestão aplicados na manufatura, mesmo os originados nos paradigmas anteriores. Por isso, a interação entre o sistema proposto pela TOC para o ambiente de manufatura e a adoção das novas tecnologias nos sistemas produtivos é o enfoque do trabalho. Destaca-se que atividades gerenciais estritamente ligadas à área de manufatura, como as de planejamento e controle da produção, são o ponto central de investigação.

O segundo recorte é com relação ao arcabouço teórico da TOC. As tecnologias disruptivas da Indústria 4.0 poderiam suportar técnicas, ferramentas e atividades em praticamente todas as áreas de atuação da TOC. Aqui, o foco está nas atividades de planejamento e controle da produção, associadas aos métodos TPC e GP. Este enfoque se dará pela relevância histórica e acadêmica dos métodos, sendo os primeiros a serem formalizados na literatura em TOC (SCHRAGENHEIM; RONEN, 1990, 1991) e com desenvolvimentos recentes, como o TPC Simplificado (TPC-S) (LEE et al., 2010). A abordagem da TOC voltada ao PCP ainda apresenta relevância acadêmica, sendo a com maior número de publicações recentes (IKEZIRI et al., 2019). Suporte a mecanismos específicos dos processos de raciocínio, gestão de projetos por corrente crítica, distribuição e varejo e processo de melhoria contínua (*process of on-going improvement* - POOGI), por exemplo, não entram no escopo do trabalho.

#### **1.4. JUSTIFICATIVAS E RELEVÂNCIA DA PESQUISA**

Por ser tratar de uma revolução tecnológica, é natural que a literatura em Indústria 4.0 tenha se voltado a aplicações das tecnologias digitais nos processos de fabricação, visando viabilizar fábricas inteligentes. Por exemplo, tem-se o uso de realidade aumentada (RA) para manutenção industrial (ABDUL RANI et al., 2020; CERUTI et al., 2019; EGGER; MASOOD, 2020) ou de *big data* para otimizar a eficiência energética de processos de usinagem (LIANG et al., 2018).

Porém, as mesmas tecnologias disruptivas, por se basearem na coleta e tratamento de *big data* e conexão entre recursos e setores via IoT, apresentam contribuições significativas para processos gerenciais. Há evidências de uso de tecnologias inteligentes para gestão da manutenção (BOKRANTZ et al., 2020; SILVESTRI et al., 2020), gestão da cadeia de suprimentos (BEN-DAYA; HASSINI; BAHROUN, 2019; GUPTA et al., 2020; POURNADER et al., 2020) e logística (CORRÊA; SAMPAIO; BARROS, 2020; STRANDHAGEN et al., 2017). Especificamente para a gestão da produção, a agenda de pesquisa de Galati e Bigliardi (2019) indica as questões “Quais são as implicações organizacionais das soluções da Indústria 4.0 para o gerenciamento de operações?” e “Como as tecnologias podem evoluir para desenvolver soluções totalmente integradas e em tempo real?”. Investigar os usos das tecnologias para atividades de PCP vem ao encontro dessas demandas, sendo um assunto tratado na literatura recente, como será discutido a seguir.

São diversas as aplicações de tecnologias inteligentes para gestão de sistemas produtivos. Por exemplo, a literatura aponta uso de sistemas ciberfísicos no chão de fábrica para apoiar atividades de sequenciamento (ROMERO-SILVA; HERNÁNDEZ-LÓPEZ, 2020). A automatização dessa atividade foi interesse da TOC no início de seu desenvolvimento (GOLDRATT, 1988). Identificação e rastreamento de materiais (HOFMANN; RÜSCH, 2017), gestão da separação de pedidos (LEE et al., 2018) e programação e controle da produção (KAMBLE; GUNASEKARAN; DHONE, 2020; MONOSTORI et al., 2016; ROJAS; RAUCH, 2019) são outros campos de aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 no contexto de gestão de operações.

Com relação ao impacto das novas tecnologias digitais em filosofias de PCP, tem-se a manufatura enxuta como principal campo de pesquisa. Baseando-se em aplicações publicadas na literatura acadêmica, Husen e Komarudin (2020) propuseram um *framework* teórico, apresentando práticas *lean* suportadas por tecnologias da Indústria 4.0. Ao estudar casos de integração do *Lean-Six-Sigma* e Indústria 4.0, Chiarini e Kumar (2020) citam a necessidade reinventar ferramentas de mapeamento tipicamente adotadas. Por sua vez, Gupta e Modgil (2019) revisaram aplicações diversas de *big data* ao *Lean-Six-Sigma*.

No campo de estudos empíricos, Kamble et al. (2020) apontam que práticas *lean* são um mediador dos efeitos das tecnologias da Indústria 4.0 para o desempenho operacional sustentável das empresas. Também há indícios de que a Indústria 4.0 modera o efeito das práticas *lean* na melhoria do desempenho operacional. Tecnologias aplicadas aos processos teriam impacto negativo ao moderar práticas de redução dos *setups* enquanto tecnologias relacionadas a produtos e serviços moderam positivamente práticas ligadas à melhoria do fluxo (TORTORELLA; GIGLIO; VAN DUN, 2019).

Uma investigação semelhante à realizada para o *lean manufacturing* e o JIT é recomendável para o TPC/GP. A seção 3 apresenta a revisão sistemática sobre Indústria 4.0 e TOC, realizada por este autor, e que evidencia a lacuna de trabalhos endereçando diretamente os métodos TPC e GP. A maioria dos estudos encontrados exploram tecnologias individuais na análise ou tratam de conceitos de TOC de forma ampla. Por exemplo, o estudo de Biel e Glock (2018) avalia, por meio de modelos de simulação computacional, como a abordagem do OPT de Goldratt pode maximizar os benefícios que efeitos de aprendizado oferecem em sistemas de produção simulados. Outro estudo de simulação com uso de pulmões de produção e apresentando discussões sobre Indústria 4.0 é o de Kundu et al. (2018). Ainda, são propostos alguns modelos

matemáticos baseados na TOC, aplicados a sistemas que incorporam técnicas da Indústria 4.0 (TSAI, 2018; TSAI; LAI, 2018; TSAI; LU, 2018). Por fim, Balaji et al. (2018) utilizam do mecanismo de identificação de recursos restritivos da TOC para focalizar a implantação de IoT.

Com relação a publicações específicas sobre TPC, há relatos de sistemas celulares de manufatura que o utilizam para desencadear a produção, com estoques servidos por veículos autônomos (*automated guided vehicles* – AGVs) (RÜTTIMANN; STÖCKLI, 2020). Ao comparar sistemas com diferentes mecanismos de controle em ambientes *flow shop* flexíveis, Costa et al. (2019) apontam o TPC como melhor mecanismo para controle de atividades em situações em que a Indústria 4.0 teria impacto na tomada de decisão, como em sistemas simulados. Estudando sistemas de produção com planejamento de horizonte rolante, Saif et al. (2019) desenvolveram um algoritmo heurístico baseado nas regras do TPC, visando à geração de planos atualizados em tempo real, como requerido por fábricas inteligentes.

Destaca-se que o uso de diferentes tecnologias como apoio às atividades do TPC e GP não foi explorado por estes trabalhos. Tsai e Jhong (2019), ao concluir seu artigo sobre a aplicação combinada da contabilidade gerencial da TOC e do ABC, afirmam que as técnicas atuais da Indústria 4.0 podem ser usadas para monitorar e controlar o progresso da produção. Este trabalho procura contribuir no preenchimento dessa lacuna.

Ainda, a pesquisa em Indústria 4.0 até agora tem sido caracterizada por uma prevalência de artigos conceituais no campo de operações e produção. Embora isso possa ser parcialmente justificado pela novidade do tema e a consequente adoção limitada pelas empresas, a pesquisa científica não pode deixar de lado o contato com o mundo industrial. Um dos principais desafios para as pesquisas futuras da Indústria 4.0 é, portanto, realizar mais investigações empíricas (KOH; ORZES; JIA, 2019). Analisar a opinião de especialistas possibilita a expansão do conhecimento empírico sobre o fenômeno no campo da gestão de operações.

Outro ponto apontado por Koh, Orzes e Jia (2019) é que a dificuldade de se trabalhar com métodos quantitativos em pesquisas sobre a Indústria 4.0 é a falta de construtos que baseiem a operacionalização por questionários ou dados secundários. Neste trabalho, também é apresentada uma proposta de construto de grupos tecnológicos da Indústria 4.0, desenvolvido a partir de revisão sistemática de *frameworks* de pesquisa desenvolvidos ao longo dos últimos anos, encontrados em sua maioria em trabalhos teóricos e conceituais.

Por fim, este trabalho procura apresentar uma contribuição metodológica, no campo da Tomada de Decisão com Múltiplos Critérios. Para realizar a avaliação simultânea do impacto dos diversos grupos tecnológicos da Indústria 4.0 nas atividades que compõem o TPC e o GP, optou-se por integrar um método para atribuição de pesos a critérios (*Best-Worst Method* ou BWM) e uma técnica de avaliação de desempenho de alternativas pela similaridade com uma solução ideal (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* ou TOPSIS). Há algumas aplicações de BWM e TOPSIS de forma conjunta presentes na literatura (DENG et al., 2020; FAN; GUO; WU, 2020; LAHRI; SHAW; ISHIZAKA, 2021; YOU et al., 2017), porém com dados de bases internas de empresas e não via coleta com especialistas. Não há indicação na literatura da aplicação de BWM-TOPSIS para hierarquização de alternativas tecnológicas por meio de levantamento tipo *survey* com grande número de respondentes. O BWM, por reduzir o número de comparações pareadas, tem potencial para facilitar a coleta remota com especialistas e diminuir o nível de inconsistência na amostra (MI et al., 2019).

Ademais, foram aplicados métodos de análise auxiliares para testar diferenças significativas entre as alternativas e propor classes de critérios e alternativas. Isso foi possível pois os métodos foram aplicados por meio de levantamento tipo *survey*, com uma amostra de dezenas de especialistas. Ainda, alguns dos respondentes participaram de uma etapa complementar, qualitativa, da pesquisa. Por meio de questionário aberto, os especialistas puderam discutir os resultados da etapa quantitativa e explorar mais profundamente os temas TOC e Indústria 4.0. Esta abordagem mista se mostrou adequada para a avaliação do suporte tecnológico a diferentes atividades.

## **1.5. ESTRUTURA DA TESE**

Este trabalho está dividido em seis capítulos, brevemente apresentados a seguir.

1. Introdução: Procura apresentar o contexto da pesquisa (1.1.), suas motivações principais, apontando a questão e objetivos de pesquisa (1.2.). Além disso, nesta seção é discutido o recorte de pesquisa adotada (1.3.), bem como as principais justificativas e originalidade dos resultados (1.4). Por fim, a estrutura do trabalho é descrita (1.5).
2. Fundamentação Teórica: Estrutura os principais conceitos sobre os dois grandes temas integrados na Tese, bem como detalhando os componentes dos construtos aplicados nos questionários aplicados na pesquisa de campo. São revisadas as

literaturas básicas sobre Indústria 4.0 (2.1.) e Teoria das Restrições e sua abordagem para o PCP (2.2.).

3. Revisão sistemática da literatura em Indústria 4.0 e TOC: Como forma de justificar o objetivo de pesquisa e embasar a discussão dos resultados da pesquisa empírica, foi proposta uma revisão dos estudos que integraram conceitos de TOC e Indústria 4.0. Como essa revisão seguiu uma sistemática própria, paralela ao restante da fundamentação teórica, optou-se por apresentar seu método e resultados em seção específica.
4. Materiais e métodos: Detalha o método de pesquisa, que se dividiu em uma etapa quantitativa, com o desenvolvimento de análise por métodos de tomadas de decisão multicritério (4.1.) e uma etapa qualitativa, com aplicação de questionário aberto aos especialistas convidados (4.2.).
5. Resultados e discussões: As principais descobertas da pesquisa de campo são discutidas, apresentando os principais resultados produzidos pela análise quantitativa (5.1.) e qualitativa (5.2.) dos dados coletados.
6. Conclusões: Nesta seção, é discutido o atendimento dos objetivos da pesquisa (6.1.), bem como as principais contribuições teóricas (6.2.) e gerenciais (6.3.) da Tese são resumidas. Por fim, as principais limitações, lacunas de estudo e propostas de pesquisa futuras são apresentadas (6.4.).

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Esta seção procura realizar uma revisão teórica dos principais temas tratados nesta Tese e que formam os construtos a serem aplicados na etapa quantitativa da pesquisa. A Seção 2.1. que trata da Indústria 4.0 e seu impacto na gestão de operações. Já a seção 2.2. apresenta os fundamentos da TOC e de sua abordagem para PCP.

### **2.1. TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 E GESTÃO DE OPERAÇÕES**

Esta seção é estruturada a partir de uma revisão dos conceitos da Indústria 4.0 e de suas principais tecnologias (2.1.1.), suas aplicações no PCP (2.1.2.), e uma discussão sobre o ambiente de incerteza e variabilidade da produção na Indústria 4.0 (2.1.3.).

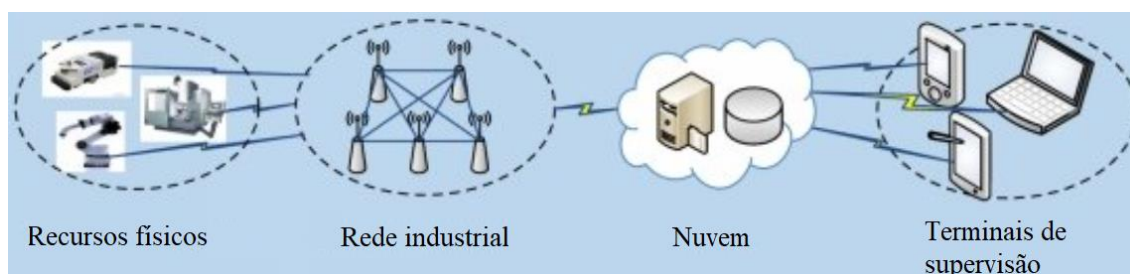


### 2.1.1. A Indústria 4.0 e as suas tecnologias emergentes

O termo Indústria 4.0 foi cunhado na Alemanha e foi adotado pelo governo deste país como uma iniciativa para mudanças expressivas em sua manufatura (XU; XU; LI, 2018). A base desta chamada “quarta revolução industrial” é a integração de tecnologias disruptivas como a *Internet* das Coisas, Computação em Nuvem, Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina para elevar os níveis de eficiência e qualidade na atividade industrial a um novo patamar (LASI et al., 2014). Atualmente, entende-se que a Indústria 4.0 se baseia na transformação digital de todos os mercados industriais e de consumo, desde o advento da manufatura inteligente até a digitalização de todos os canais de entrega de valor (SCHROEDER et al., 2019). Um dos objetivos principais desta revolução é a automação de processos por meio da integração da arquitetura orientada a serviços, mecanismos de inteligência e sistemas proativos de manutenção (KRISHNAMURTHI; KUMAR, 2020).

Dentro deste novo paradigma industrial, há uma nova concepção de fábrica representada pelas chamadas fábricas inteligentes (do inglês, *smart factory*). Uma fábrica inteligente integra tecnologias físicas e tecnologias cibernéticas, tornando as tecnologias envolvidas mais complexas e precisas, a fim de melhorar a gestão, transparência e, conseqüentemente, o desempenho dos processos de fabricação (SHI et al., 2020). Uma fábrica deste tipo seria um grande sistema industrial conectado de materiais, peças, máquinas, ferramentas, estoque e logística que pode transmitir dados e se comunicar mutuamente (LADE; GHOSH; SRINIVASAN, 2017). A Figura 1 apresenta um *framework* que resume os principais elementos da fábrica inteligente.

Figura 1 - *Framework* da fábrica inteligente no contexto da Indústria 4.0



Fonte: Wang et al. (2016c).

Parte das tecnologias listadas comumente entre as pertencentes a esta revolução industrial são advenços de revoluções industriais anteriores como, por exemplo, a

realidade virtual que tem sua origem em 1957 (CRUZ-NEIRA; FERNÁNDEZ; PORTALÉS, 2018). Entretanto, uma das características fundamentais desta revolução industrial, que a distingue das anteriores, é a integração de tecnologias em um nível nunca visto em que há comunicação em tempo real entre os sistemas com mínima interferência humana.

Um conceito que representa essa integração é o de sistemas ciberfísicos que são aqueles que agregam computação com processos físicos em um ambiente de rede (MONOSTORI, 2018). Nestes sistemas, computadores embarcados e redes supervisionam e ajustam os processos físicos, com ciclos de *feedback* onde os processos físicos afetam os cálculos computacionais e vice-versa (LEE; SESHIA, 2017). Sistemas ciberfísicos se diferenciam de sistemas embarcados. Sistemas embarcados envolvem computadores e *softwares* incorporados em dispositivos cuja principal missão não seja a computação, como carros, brinquedos, e aparelhos médicos (JIMÉNEZ; PALOMERA; COUVERTIER, 2014). Por sua vez, Sistemas ciberfísicos evoluíram a partir destes dispositivos embarcados, abrangendo a interação entre estes em uma rede, e a interação deste conjunto com os processos físicos e a intervenção humana (LEE; SESHIA, 2017).

A seguir serão discutidos os principais grupos de tecnologias da Indústria 4.0 que serão base da pesquisa empírica desta tese. Importante destacar que o fenômeno da Indústria 4.0 também pode ser estruturado de outras formas, além da listagem de suas tecnologias representativas. Literatura recente tem abordado o tema por meio de pacotes ou nichos tecnológicos, que envolvem diversas tecnologias integradas em sistemas (BENITEZ; AYALA; FRANK, 2020; FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Na presente pesquisa, deu-se preferência por abordar as tecnologias de maneira separada, de forma a analisar a sua priorização em termos de atenção gerencial e alocação de recursos. Contudo, ressalta-se que algumas das tecnologias exploradas possuem complementaridades ou mesmo interdependências a serem observadas em aplicações na manufatura.

De forma a identificar as principais tecnologias e conceitos ligados à Indústria 4.0, foi realizada uma revisão sistemática de trabalhos que tenham apresentado ou citado *frameworks* teóricos e construtos sobre o tema. A busca de publicações foi feita na base de dados *Scopus* e foram aplicados os termos de busca "*industry 4.0*" ou "*fourth industrial revolution*" ou "*4th industrial revolution*" em combinação com os termos *technologies* ou *framework* ou *principles* ou *dimensions* ou *concepts*. O uso destes termos visava identificar um conjunto abrangente de trabalhos conceituais, que tenham

explorado a definição e os principais componentes da Indústria 4.0. De forma a limitar a busca a pesquisas na área de manufatura e produção, também foram combinados o termo “*production*” e utilizados os filtros de área da *Scopus* para restringir os resultados a publicações nas áreas de Engenharia, Gestão e Ciências da Decisão. Por fim, a amostra foi restringida a artigos de periódico científico em língua inglesa.

A pesquisa envolveu o escrutínio de 908 publicações disponíveis na *Scopus* até o dia 13/02/2020. A análise inicial se deu pela leitura de título e resumo, por ordem de data de publicação, do artigo mais recente ao mais antigo. Caso o conteúdo indicasse aderência ao tema da pesquisa, prosseguia-se à análise do texto integral em busca de *frameworks* e listas de conceitos/tecnologias. O foco da coleta foi selecionar *frameworks* e listas de conceitos discutidos teoricamente ou usados empiricamente (por exemplo, na elaboração de instrumentos de pesquisa para levantamentos tipo *survey*). Conjunto de termos de busca usadas em revisões sistemáticas em Indústria 4.0 não foram incluídos na análise, assim como os casos de artigo sem acesso ao texto integral foram excluídos.

Foram ao todo identificados 63 *frameworks* e construtos de conceitos e tecnologias da Indústria 4.0. Os componentes de cada *framework* foram extraídos, totalizando 772 aparições. Foi realizada uma análise individual dos componentes, alocando-os a grupos temáticos formando classes de tecnologias e conceitos. Durante esta etapa, 80 termos não puderam ser alocados a nenhum grupo tecnológico e não seguiram para análises posteriores. Alguns exemplos de termos não alocados são *advanced manufacturing*, *IT Infrastructure*, *Advanced Manufacturing Solutions*, *Exponential Technologies*, *Internet*, *Open Source*, *Product's connectivity*, *Product's monitoring*, *Product's control*, *Operations planning*, *IT-based production management* e *Smart product*.

Os grupos de tecnologias identificados foram “Simulação, realidade virtual e realidade aumentada”, “*Big data* and *data analytics*”, “*Internet* das Coisas”, “Robótica e automação avançada”, “Computação e manufatura em nuvem”, “Manufatura aditiva”, “Sistemas de controle da produção (MES/SCADA/ERP)”, “IA e aprendizagem de máquina”, “Sistemas Ciberfísicos”, “redes de sensores sem fio”, “Cibersegurança”, “Tecnologias de identificação e rastreamento”, “Tecnologias móveis”, “Integração vertical e horizontal”, “Interação homem-máquina”, “Tecnologias máquina-a-máquina”, “Soluções de gestão de energia”, “Gestão do ciclo de vida de produto”, “Materiais avançados e nanotecnologia”, “Troca de dados entre fornecedores e clientes” e

“Sistemas integrados de desenvolvimento de produtos e manufatura”. O Quadro 1 apresenta os grupos tecnológicos compilados a partir da análise dos *frameworks* da literatura em Indústria 4.0, bem como uma breve descrição, os termos integrantes do grupo e a frequência que os termos de cada grupo apareceram nos *frameworks* analisados.

Estes grupos apresentam características distintas, que permitem classificá-los em três classes, aqui denominadas Conceitual (classe 1), Tecnologias Capacitadoras ou Facilitadoras - *Enabling Technologies* (classe 2) e Aplicações ou Soluções Tecnológicas (classe 3). Explicações mais detalhadas sobre as classes são indicadas a seguir.

Quadro 1 - Grupos tecnológicos da Indústria 4.0 pela análise de *frameworks* teóricos

Grupo de tecnologias – Número da classe (1- conceituais, 2 – capacitadoras, 3 – soluções tecnológicas)	Freq.	Descrição do grupo	Termos integrantes do grupo
<b>Simulação, realidade virtual e realidade aumentada – 3</b>	123	Soluções baseadas na produção de ambientes virtuais simulados e versões digitais de sistemas físicos de forma a efetuar análises ou visualização de dados e imagens (DE PAULA FERREIRA; ARMELLINI; DE SANTA-EULALIA, 2020a).	<i>Augmented Reality, wearable sensors, smart glasses, smart gloves, smart watches, Virtual Reality, Holograms, simulation, digital wearables, Mixed Reality, Simulation and modeling, digital twin, simulation/analysis of virtual models, manufacturing simulation, digital visualization, visualization technologies, digital manufacturing, video-based models, 3D models, automatic analysis and visualization of data, digital documentation, simulation tools, 2D/3D vision systems, virtual validation, virtual commissioning, simulation &amp; prototype, virtualization method, virtual enterprise, adaptive manufacturing, CAD, CAM, CAx, data visualization, visual computing, 3D scanning, computer-integrated manufacturing, agent-based system, hybrid prototyping, digital manufacturing.</i>
<b>Big data e Data analytics – 3</b>	76	Soluções que buscam coletar, integrar e analisar dados massivos provenientes de fontes diversas, utilizando técnicas de Data Science e Business Analytics (WIECH et al., 2020).	<i>Big data, Big data analytics, data mining, Data analytics, Data collection, Data storage, Big data and Analytics, analytics software, industrial big data, advanced analytics, CRISP-DM, autonomous data exchange, single source of truth of data, real-time data.</i>
<b>Soluções em Internet das Coisas – 3</b>	68	Plataformas e módulos voltados à comunicação e conectividade entre máquinas e usuários em	<i>Internet of Things, IoT, digital services, digital product-service system, Internet of Things and Services, Industrial Internet, Industrial Internet of Things,</i>

		rede via <i>Internet</i> (ZHANG et al., 2018).	<i>IIoT, Internet of Services, IoS, Internet of People, Internet of Everything, Web of Things, ubiquitous computing, web-based organization.</i>
<b>Automação e robótica - 3</b>	67	Uso de máquinas e veículos autônomos, com maior flexibilidade, percepção e integração e projetados para interação direta com humanos em ambientes de trabalho colaborativos (ROSSI et al., 2020).	<i>Advanced robotics, autonomous robots, collaborative robots, cobots, industrial robotics, robotic stations on automated production line, industrial robots, automated guided vehicles, smart robots, robotic systems, automation, automated and robotized production, flexible and autonomous lines, autonomous vehicles, autonomous guided vehicles (AGV), autonomous transportation, driverless vehicles, autonomous vehicles, drones, digital automation without sensors, automation of internal logistics, automation systems.</i>
<b>Computação e manufatura em nuvem – 3</b>	66	Serviços voltados a prover armazenamento, transferência e processamento remoto de dados (DALMARCO et al., 2019).	<i>Cloud computing, cloud manufacturing, cloud services, cloud data and storage, fog and mobile cloud, industrial cloud, cloud robotics.</i>
<b>Manufatura aditiva - 3</b>	55	Tecnologias de manufatura e prototipagem voltadas à impressão tridimensional de peças, por meio da deposição de material em camadas, a partir de um modelo digital ou de escaneamento 3D da forma geométrica de objetos (ZHANG et al., 2020).	<i>3D printing, additive manufacturing, rapid prototyping, fast prototyping, 3D impression.</i>
<b>Sistemas inteligentes de controle da produção, MES, SCADA e ERP - 3</b>	50	Sistemas que apoiam o registro e organização de dados de produção, a rastreabilidade de produtos, a análise do desempenho e a execução de ações sobre o sistema em tempo real (TSAI; LAN; LEE, 2020).	<i>MES, Manufacturing Execution System, SCADA, Supervisory Control and Data Acquisition, ERP, Enterprise Resource Planning, information systems, near real-time production control systems, machine and process controllers, software for production planning and control, real-time production control system (centralized operating and machine data acquisition), advanced ERP technology, intelligent ERP, process-control system, programmable logic controller, real-time planning and control, remote monitoring of production, remote operation of production, real-time communication/data, remote control, distributed (network) control system, predictive maintenance, predictive maintenance through real-time monitoring, intelligent control, production process autonomous</i>

			<i>management, digital automation with process control sensors, real-time monitoring and manufacturing information.</i>
<b>Aprendizagem de máquina e IA – 3</b>	36	Modelos computacionais treinados por meio do estímulo de dados e imagens e capazes de realizar previsões e tomar decisões cada vez mais precisas, de forma semelhante à capacidade humana de raciocínio e aprendizagem (HELO; HAO, 2021).	<i>Machine learning, artificial intelligence, AI, learning software, AI for predictive maintenance and production planning, semantics and ontologies, semantic technologies, semantic modeling, predictive analytics, cognitive computing, knowledge based engineering, knowledge decision-making techniques.</i>
<b>Sistemas ciberfísicos - 1</b>	36	Sistemas de entidades computacionais colaborativas que estão em intensa conexão com o mundo físico circundante (MONOSTORI et al., 2016).	<i>Cyber-Physical Systems, CPS, cloud-integrated CPS (CCPS), IoT and CPS, Embedded Systems, self-steering manufacturing systems, self-diagnosing, adapting, healing, monitoring, calibrating devices and machines, embedded intelligence, software interfaces (plug and produce).</i>
<b>Redes de sensoriamento sem fio – 2</b>	33	Dispositivo que recebe entradas do ambiente físico e usa recursos de computação integrados para executar funções predefinidas na detecção de entradas específicas e no processamento e transmissão de dados (SAVAZZI; RAMPA; SPAGNOLINI, 2014).	<i>Sensors, actuators, machines with digital interfaces and sensors, sensors for operating conditions identification, smart sensors, advanced sensors, sensor networks, smart actuators, last-generation sensors, sensing, soft-sensors, wireless networks, automatic nonconformities identification in production, wireless sensor networks, ad-hoc sensor networks.</i>
<b>Cibersegurança – 3</b>	31	Tecnologias para proteção de sistemas, redes e programas contra ataques digitais, voltados a acessar, mudar ou destruir informações sigilosas ou interromper o funcionamento de processos normais em negócios (DALMARCO et al., 2019).	<i>Cyber-security, Cyber-security technologies, cyber-security systems interoperability and cibersecurity solutions, cloud and cyber-security, network security, blockchain, blockchain technology.</i>
<b>Tecnologias de identificação e rastreamento (RFID/QR code/Barcode/GPS) - 3</b>	18	Dispositivos para identificação e rastreabilidade de materiais e recursos (CHAO; YANG; JEN, 2007).	<i>RFID, Auto ID, communication interfaces (Ethernet, Wi-Fi, RFID, GPS), barcode, QR code, GPS tracking, tracking, and tracing, identification and traceability of raw materials and final products.</i>
<b>Tecnologias móveis - 3</b>	16	Dispositivos portáteis de comunicação bidirecional, dispositivos de computação e a tecnologia de rede que os conecta. É tipificada por dispositivos habilitados para a <i>Internet</i> , como	<i>Mobile/wireless devices for providing services, mobile terminal equipment, real-time scanning by smartphone or tablet application, mobile app, mobile interfaces, mobile internet, smartphones, tablets, wireless technologies, mobile computing.</i>

		<i>smartphones</i> , tablets e relógios (DEL CERRO VELÁZQUEZ; MORALES MÉNDEZ, 2018).	
<b>Integração vertical e horizontal - 1</b>	12	Integração horizontal prevê redes entre máquinas individuais e unidades de produção. Redes de integração vertical envolvem, desde o sensor até o nível de negócios da empresa. A integração horizontal garante que máquinas, dispositivos de IoT e processos de engenharia trabalhem juntos. A integração vertical permite que os dados de produção sejam utilizados para a tomada de decisões, permitindo a comunicação entre a rede de chão de fábrica integrada horizontalmente e outros sistemas, como o ERP (SONY; NAIK, 2020).	<i>Horizontal and Vertical Systems Integration, horizontal/vertical integration, integration of horizontal and vertical systems.</i>
<b>Interação Homem-Máquina - 1</b>	9	Sinergia entre humanos, robôs e outras máquinas, o que aumenta suas capacidades por meio de tarefas interativas e de apoio. Tecnologias que permitem a integração de seres humanos nos <i>cyber-physical systems</i> ou CPS. Luzes indicadoras, botões e alavancas para interfaces gráficas do usuário (GUI), teclados, mouse e telas sensíveis, interfaces multimodais, reconhecimento automático de fala, controle visual de gestos usando movimentos corporais (GORECKY et al., 2014).	<i>Technologies for safe human-machine interaction, human-computer interaction, human-machine, human-machine interface, human-machine interaction, robotic exoskeletons, assistant systems for operators, human-machine collaboration.</i>
<b>Tecnologias Máquina a Máquina (M2M) - 1</b>	7	Qualquer tecnologia que permita que dispositivos em rede troquem informações e executem ações sem a assistência manual de seres humanos. O principal objetivo é acessar os dados do sensor e transmiti-los para os	<i>Linked data (machine to machine, machine to machine, machine-to-machine communication, M2M communication.</i>

		<p>sistemas M2M geralmente usam redes públicas e métodos de acesso, como celular ou Ethernet, para torná-lo mais econômico. Os principais componentes de um sistema M2M incluem sensores, RFID, um link de comunicação celular ou Wi-Fi e <i>software</i> programado para ajudar um dispositivo de rede a interpretar dados e tomar decisões (IVANOV et al., 2021). Exemplos: 6LoWPAN, ZigBee, Bluetooth.</p>	
<b>Soluções de gestão de energia – 3</b>	6	<p>Rede elétrica inteligente, que se utiliza de TI para melhorar a eficiência dos recursos energéticos (SOARES et al., 2017).</p>	<i>Energy efficiency monitoring and improving system, energy saving/efficiency, energy consumption and saving, smart grid.</i>
<b>Gestão do ciclo de vida do produto - 3</b>	6	<p>O manuseio de um bem à medida que ele avança nos estágios típicos de sua vida útil: desenvolvimento e introdução, crescimento, maturidade/ estabilidade e declínio. Esse manuseio envolve tanto a fabricação quanto a comercialização. O conceito de ciclo de vida do produto ajuda a informar a tomada de decisões de negócios, desde preços e promoção até expansão ou redução de custos (TJAHJONO et al., 2017).</p>	<i>Product-Lifecycle-Management, Product-Lifecycle-Management systems, PLM.</i>
<b>Materiais novos/avançados e nanotecnologia - 2</b>	6	<p>Os materiais utilizados em aplicações de alta tecnologia são denominados materiais avançados. Esses materiais avançados são tipicamente materiais tradicionais cujas propriedades foram aprimoradas e materiais de alto desempenho recém-desenvolvidos. Além disso, eles podem ser de todos os tipos de materiais (por exemplo, metais, cerâmica, polímeros) e</p>	<i>New materials, smart materials, advanced materials, nanotechnology, Nanotech for 3D printing.</i>



		normalmente são caros. Os materiais avançados incluem semicondutores, biomateriais, materiais inteligentes e materiais nanoestruturados (BONGOMIN et al., 2020).	
<b>Troca de dados entre fornecedores e clientes - 1</b>	5	Colaboração entre fornecedores e clientes a partir do compartilhamento de dados. A possibilidade de compartilhar dados de maneira segura por meio de uma nuvem ou de uma comunicação de ponta a ponta, sem gateway e servidor de suporte, aprimorando o sistema de distribuição e gerenciamento de inventário nas empresas (ABDIRAD; KRISHNAN, 2020).	<i>Data exchange of data with suppliers/customers, sharing data with suppliers, collaboration with suppliers/customers through real-time data sharing, digital platforms with suppliers, customers and other units, digital exchange of data with suppliers/customers.</i>
<b>Sistemas integrados de desenvolvimento de produto e manufatura - 3</b>	5	Sistemas para desenvolvimento integrado do projeto e manufatura do produto. Este tipo de sistema, quando integrado com processos de manufatura aditiva, leva a tempos de <i>setup</i> mais baixos devido a uma redução na complexidade, facilitando a modularização e customização em massa (DALENOGARE et al., 2018; TORTORELLA et al., 2018).	<i>Integrated Engineering Systems, system integration, integration of IT systems.</i>

Fonte: Elaborado pelo autor.

A classe 1 foi chamada de Conceitual. É composta de termos que exprimem conjuntos de tecnologias integradas ou algum fenômeno que ocorre por meio de tecnologias (BARTODZIEJ, 2017; ROJKO, 2017). Está mais para uma representação abstrata do que para uma tecnologia capaz de ser adquirida e aplicada. Por exemplo, o sistema ciberfísico (do inglês *cyber-physical system* ou CPS) é uma representação de uma combinação avançada entre elementos físicos e computacionais e não uma tecnologia em si. Este sistema pode incluir diferentes soluções de IoT, inteligência artificial e robótica avançada (ZHOU; LIU; LIANG, 2016). *Smart grids*, veículos autônomos e sistemas de controle industrial podem ser considerados CPS (MALIK et

al., 2021). Outro exemplo é o conceito de integração horizontal e vertical, que pode ser alcançado por meio do uso de redes de sensores, *internet* das coisas, SCADA e RFID, por exemplo (WANG et al., 2016d). O mesmo pode-se dizer do conceito de interação homem-máquina. Este tipo de interação é possibilitado por dispositivos móveis, robôs colaborativos, aplicativos de reconhecimento de voz e inteligência artificial (OSTERRIEDER; BUDDE; FRIEDLI, 2020).

Já as tecnologias da classe 2 podem ser chamadas de capacitadoras ou facilitadoras (*Enabling Technologies*) ou ainda tecnologias transversais, pois impactam ou embasam diversas aplicações, como nanotecnologia e redes de sensoriamento *wireless*. Por fim, a classe 3 inclui aplicações ou soluções tecnológicas, que podem ser adquiridas como dispositivos, sistemas ou pacotes computacionais e têm aplicação específica e direta no ambiente de manufatura. Inclui tecnologias com função bem definida e identificável, como, por exemplo, soluções em IoT, *big data*, realidade aumentada e dispositivos *smart*.

Das classes identificadas nesta revisão sistemática, apenas a classe 3 apresenta soluções tecnológicas específicas, que podem ser aplicadas em ambiente empresarial, de forma a suportar atividades de gestão como o PCP. A classe 1 apresenta conceitos importantes para caracterizar a 4ª Revolução como fenômeno tecnológico, mas não inclui aplicações. Da mesma forma, a classe 2 contém tecnologias que baseiam outras implementações, como a nanotecnologia e redes sem fio, mas sem aplicação direta para atividades gerenciais. Dessa forma, as tecnologias a serem diretamente investigadas neste trabalho, baseando os instrumentos de pesquisa, pertencem à classe 3.

A princípio, as 14 tecnologias foram incluídas no questionário para um teste piloto. Após o teste, quatro componentes foram eliminados por apresentarem baixa pontuação relativa ou serem desconsideradas por múltiplos participantes. A explicação detalhada do teste piloto está na seção 4, de método de pesquisa. Assim, o construto final apresenta 10 tecnologias. O Quadro 2 destaca essas tecnologias que fizeram parte do construto “Tecnologias da Indústria 4.0”, base para o instrumento de pesquisa descrito na seção 4.

Quadro 2 - Tecnologias da Indústria 4.0 estudadas na presente pesquisa

Tecnologias	Referências básicas
Simulação, realidade virtual e realidade aumentada	(DAMIANI et al., 2018; DE PAULA FERREIRA; ARMELLINI; DE SANTA-EULALIA, 2020b;

	HAVARD et al., 2021; JAYASEKERA; XU, 2019).
<i>Big data e Data analytics</i>	(CHEHBI-GAMOURA et al., 2020; MOKTADIR et al., 2019; WANG et al., 2016a).
Soluções em <i>Internet das Coisas</i>	(BEN-DAYA; HASSINI; BAHROUN, 2019; LIAO; DE FREITAS ROCHA LOURES; DESCHAMPS, 2018; MALIK et al., 2021).
Automação e robótica	(ALVAREZ-DE-LOS-MOZOS; RENTERIA, 2017; ROSSI et al., 2020; VIDO et al., 2020).
Computação e manufatura em nuvem	(HAO; HELO; GUNASEKARAN, 2020; LIU et al., 2019b; XU, 2012; ZHANG et al., 2014).
Sistemas inteligentes de controle da produção, MES, SCADA e ERP	(CHIARINI; KUMAR, 2020; GHOBAKHLOO; CHING, 2019; GÓMEZ PAREDES et al., 2020)
Aprendizagem de máquina e IA	(DUBEY et al., 2019; HANSEN; BØGH, 2020; HELO; HAO, 2021; USUGA CADAVID et al., 2020).
Tecnologias de identificação e rastreamento (RFID, QR code, Barcode, GPS)	(CHAO; YANG; JEN, 2007; MONSREAL et al., 2011; ZHONG et al., 2015).
Tecnologias móveis	(ACETO; PERSICO; PESCAPÉ, 2019; BARATA; RUPINO DA CUNHA; STAL, 2018; ZUNINO et al., 2020).
Sistemas integrados de desenvolvimento de produto e manufatura	(FATORACHIAN; KAZEMI, 2018; FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019; OLIVEIRA et al., 2020; YANG et al., 2018a).

Fonte: Elaborada pelo autor.

A seguir, cada tecnologia identificada no Quadro 2 é revisada, de forma a fundamentar as discussões dos resultados após aplicação da abordagem multicritério proposta.

- **Simulação, realidade virtual, realidade aumentada e *wearables***

A modelagem e simulação tem ajudado as companhias a avaliarem riscos, custos, barreiras e o impacto no desempenho operacional das implementações de Indústria 4.0 (KRISHNAMURTHI; KUMAR, 2020). O *framework* elaborado a partir de uma revisão sistemática de literatura (DE PAULA FERREIRA; ARMELLINI; DE SANTA-EULALIA, 2020b) apresenta dez abordagens básicas de simulação como os *digital twins* e realidades virtual e aumentada, além de elencar aplicações em várias áreas, com destaque para engenharia de processos, planejamento e programação de

produção e controle de estoques. Algumas das abordagens mais relevantes serão discutidas a seguir.

Uma abordagem aplicada no setor de construção é a *Building Information Modelling* (BIM) que tem avançado a gestão de projetos por agregar todas as partes envolvidas no planejamento, fornecendo informações aprofundadas sobre cada detalhe da construção que podem ser utilizadas por todos os envolvidos (ROKOOEI, 2015). O modelo BIM é uma representação digital rica em dados, orientada a objetos, inteligente e paramétrica da instalação, que pode fornecer dados adequados às necessidades de vários usuários. Um objeto BIM é uma combinação das propriedades físicas do produto, geometria, dados de visualização e dados sobre as funções do produto (WU; ZHANG, 2019). A manipulação computacional destes objetos permite a simulação da construção e operação de uma instalação.

Outras abordagens recorrentemente relacionadas à simulação no contexto de Indústria 4.0 são o uso de *digital twins* (SANTOS et al., 2020) e realidade aumentada/virtual. *Digital twin* pode ser descrito como uma representação virtual de um objeto físico ou processo, permitindo um acompanhamento em tempo real deste (TAO et al., 2018). Ele espelha o comportamento e os estados do objeto real ao longo de sua vida em um espaço virtual (VERDOUW et al., 2021). *Digital twins* representam uma evolução das tecnologias CAD/CAE/CAM (*computer-aided design, engineering and manufacturing*), possibilitando a interação com sua contraparte física (SANTOS et al., 2020). A aplicação desta tecnologia tem potencial de não exigir mais a proximidade física para controle da produção, permitindo a execução remota e automatizada, o monitoramento, o controle e a coordenação das operações (VERDOUW et al., 2021). Isso permite a dissociação dos fluxos físicos dos aspectos de informação dos processos.

Outras tecnologias de interface entre elementos digitais e o mundo real são as chamadas realidade virtual e aumentada (RATH; SATPATHY; PATNAIK, 2019). Tecnologias de realidade têm sido empregadas em gestão de operações para atividades como *design* e prototipagem (JAYASEKERA; XU, 2019), gestão de estoques, manutenção de equipamentos e treinamento de operadores (DAMIANI et al., 2018).

Realidade Aumentada (do inglês, *augmented reality* - AR) pode ser definida como uma visão direta ou indireta em tempo real de um ambiente físico do mundo real que foi aprimorado adicionando informações geradas por computador a ele. A AR permite a inserção de informações digitais na visão do mundo real (CARMIGNIANI et al., 2011). Ela se popularizou recentemente por seu uso em jogos eletrônicos

(RAUSCHNABEL; ROSSMANN; TOM DIECK, 2017). Seu uso potencial em Gestão de Operações tem sido discutido na literatura. Por exemplo, Rejeb et al. (2020) levantam aplicações práticas de AR em cinco áreas da gestão da cadeia de suprimentos: armazenamento, fabricação, vendas e logística externa, planejamento e projeto, e gestão de recursos humanos. Por permitir a visualização de informações virtuais sobrepostas a equipamentos, a realidade aumentada tem benefícios potenciais para a área de manutenção em que o técnico pode visualizar desenhos, procedimentos padrão (inclusive com sequências animadas), informações em tempo real do equipamento (HENDERSON; FEINER, 2011).

A realidade virtual (do inglês, *virtual reality* - VR) permite a imersão do usuário em um ambiente virtual simulado (DAMIANI et al., 2018). Pensado em uma escala contínua, a realidade virtual estaria no extremo oposto ao ambiente real. Entre estes extremos teríamos a realidade mista, onde o real e o virtual se confundem. A Figura 2 apresenta uma comparação entre os tipos de realidade.

Figura 2 - Contínuo entre ambiente real e realidade virtual



Fonte: Milgran e Kishino (1994).

Em gestão de operações, VR tem apoiado a transição para fábricas inteligentes. A VR oferece um ambiente visual a todas as pessoas envolvidas no processo de planejamento de produção para monitorar os fatores que levam a resultados de planejamento inadequados, além de permitir uma representação visual mais realista do que *softwares* de simulação atuais (MUJBER; SZECSI; HASHMI, 2004). Outra aplicação industrial de VR tem na formação de profissionais possibilitando imersão dos alunos em ambientes fabris simulados (NETLAND et al., 2020).

- **Soluções em *Big data* e Análise de Dados**

A ciência de dados vem produzindo modelos e ferramentas capazes de utilizar *big data* para aperfeiçoar a atividade industrial (CUI; KARA; CHAN, 2020). *Big data* são conjuntos de dados extremamente grandes que podem ser analisados computacionalmente para revelar padrões, tendências e associações, em particular sobre o comportamento humano (GEORGE; HAAS; PENTLAND, 2014). As características fundamentais do *big data* são geralmente resumidas por palavras iniciadas pela letra “V”, variando de três a sete características na literatura. Os três “V’s” originalmente conceitualizados por Doug Liney são o volume (consistindo em enormes quantidades de dados), velocidade (dados criados em tempo real) e variedade (dados estruturados, semiestruturados e não estruturados). Outras propriedades citadas na literatura são veracidade, validade, volatilidade (KHAN; UDDIN; GUPTA, 2014).

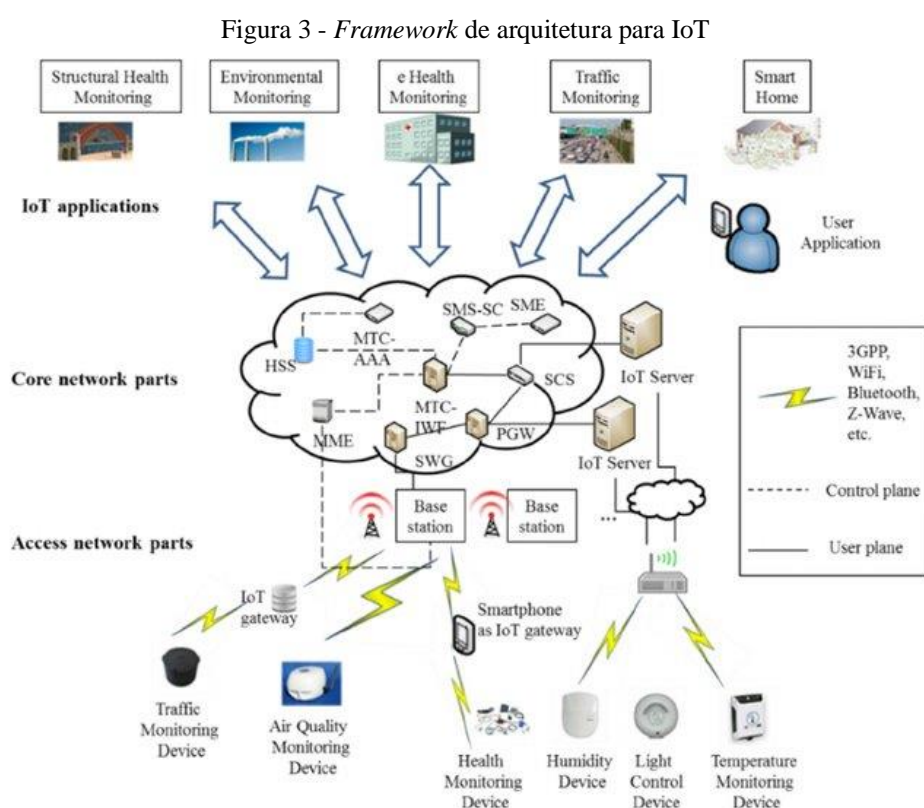
Algoritmos baseados em *machine learning* e inteligência artificial, que serão discutidos em outra categoria, utilizam esta grande disponibilidade de dados para permitir a automação de decisões antes somente confiadas à inteligência humana (PERES et al., 2020). A aplicação de modelos algorítmicos para determinar padrões em dados brutos e gerar informação útil é base para o que se chama *data analytics* (DUAN; XIONG, 2015).

*Data analytics* tem um potencial importante a ser explorado na gestão de operações. No nível estratégico, podem conduzir a tomada de decisões com relação a atividades e processos futuros, como no *strategic sourcing*, no projeto de redes de suprimentos e projeto e desenvolvimento de produtos (PAPADOPOULOS et al., 2017). Papadopoulos et al. (2017) também levantam benefícios no nível operacional, podendo ajudar a melhorar a visibilidade, flexibilidade e integração das cadeias de abastecimento, enquanto se gerencia a volatilidade e as flutuações de custo.

Hoje em dia, dados massivos de manufatura são coletados em sistemas de manufatura provenientes da *internet* das coisas e equipamentos inteligentes. A literatura apresenta aplicações de *data analytics* nas áreas que mais se beneficiam de previsões mais acuradas como na previsão de demanda, controle estatístico da qualidade e manutenção (BUENO; GODINHO FILHO; FRANK, 2020; LAMBA; SINGH, 2017). As simulações de Hoffman (2017) indicam que as três principais características do *big data* apresentam benefícios na redução do efeito chicote em cadeias de suprimento, com destaque para a propriedade “velocidade”.

- **Internet das Coisas**

Um dos conceitos que apoiam a implementação de outras tecnologias tratadas aqui é o de *Internet das Coisas (Internet of Things - IoT)*. IoT pode ser definida como a conexão de máquinas e outros recursos físicos do sistema na rede, permitindo o compartilhamento dos dados gerados por esses recursos (WORTMANN; FLÜCHTER, 2015). A base das tecnologias IoT atuais é a comunicação por meio de radiofrequência, como *WiFi*, *Bluetooth* e conexão de dados de celular (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010). É por meio da IoT que os objetos inteligentes são integrados e que dos dados circulam entre estes dispositivos que poderão tomar decisões com base neste acompanhamento em tempo real. A Figura 3 uma arquitetura genérica de IoT.



Fonte: Abbas e Yoon (2015).

Pode-se considerar como elementos formadores da IoT os chamados objetos inteligentes (do inglês, *smart objects*), isto é, objetos equipados com tecnologias de posicionamento e comunicação e integrados por meio da *internet* (KORTUEM et al., 2010). Como estes objetos possuem sensores acoplados, hoje é possível montar redes de sensores, em que ações de um determinado objeto são influenciadas pelo acompanhamento do estado dos demais (KHAN; SILVA; HAN, 2017).

Seguindo o paradigma da IoT, as tecnologias emergentes dentro das fábricas modernas estão evoluindo para ambientes inteligentes ou "Fábricas de Coisas (*Factory of Things* - FoT)", onde as tecnologias de rede sem fio e o acesso móvel à informação estão agora desempenhando um papel fundamental para o *design* eficiente de processos industriais (SAVAZZI; RAMPA; SPAGNOLINI, 2014).

Com relação à manufatura, a literatura apresenta o uso de IoT para monitorar a qualidade dos produtos, melhorar a segurança de produtos químicos e alimentos, disponibilizar dados para todos os nós da cadeia de suprimentos em tempo real e conhecer o estado do equipamento em tempo real (ALARCÓN; PEREZ; BOZA, 2016). Embora, tradicionalmente, o foco de aplicação tenha em aplicações pontuais como, por exemplo, na avaliação da integridade de máquinas e manutenção preditiva, a indústria começou a se concentrar na análise de dados de toda a linha de produção (LADE; GHOSH; SRINIVASAN, 2017).

- **Robótica e Automação Avançada**

A automação da manufatura não é nova e a robótica do sistema de produção já é altamente sofisticada. O conceito de uma fábrica "às escuras", na qual o processamento é quase inteiramente realizado por robôs, existe há décadas. No entanto, a tecnologia robótica está avançando rapidamente de maneiras que podem ter profundas implicações para fábricas, produção agrícola, gerenciamento de serviço de campo e logística de distribuição (OLSEN; TOMLIN, 2020).

Avanços recentes na tecnologia de sensores e inteligência artificial estão permitindo uma nova geração de tecnologias robóticas que podem ser implantadas ao lado de trabalhadores humanos. A indústria 4.0 tem com um dos seus marcos a implementação de robótica de última geração para aplicações industriais. Enquanto a Indústria 3.0 se concentrou na automação de máquinas e processos individuais, a Indústria 4.0 se concentra na digitalização ponta a ponta de todos os ativos físicos (ROBERT; GIULIANI; GURAU, 2020).

Por meio da integração de microprocessadores com algoritmos de IA, os robôs tornaram-se mais autônomos, mais inteligentes, flexíveis, adaptativos e sociais. Os usos de robôs se ampliaram para muitas funções, como na produção, logística e gerenciamento de escritório (para distribuir documentos) e podem ser controlados remotamente (POSCHMANN; BRÜGGEMANN; GOLDMANN, 2020).



De acordo com Silvestre et al. (2020), a robótica avançada está sendo aplicada a tarefas como manutenção preditiva. Neste contexto, pode-se monitorar as condições das máquinas, realizar análises comparativas e diagnosticar e prever as falhas das máquinas. O robô colaborativo (*cobot*) pertence a uma nova geração de robótica, trabalhando de forma cooperativa com os humanos, sem exigir nenhuma restrição de segurança. *Cobots* são programados para melhor acessibilidade, flexibilidade e facilidade de uso.

Estes robôs adaptativos são úteis em sistemas de manufatura, especificamente nas fases de projeto, manufatura e montagem porque são autônomos com capacidade de pensamento dinâmico e princípio de trabalho intensivo de resposta. Eles podem ser parados ou mudar suas posições se alguém aplicar força anormal ou se eles entrarem em contato com humanos (THOBEN; WIESNER; WUEST, 2017).

Resumindo, a robótica e automação no contexto da Indústria 4.0 visam projetar e utilizar robôs que possuam habilidades cognitivas, como análise, tomada de decisão e raciocínio. Neste contexto, a automação atingiu outro nível ao conectar todos os processos de produção e técnicas de fabricação por meio da IoT (FATORACHIAN; KAZEMI, 2020). As fábricas tornaram-se inteligentes com máquinas e processos mais autônomos que podem trocar informações, acionar ações e controlar uns aos outros de forma independente.

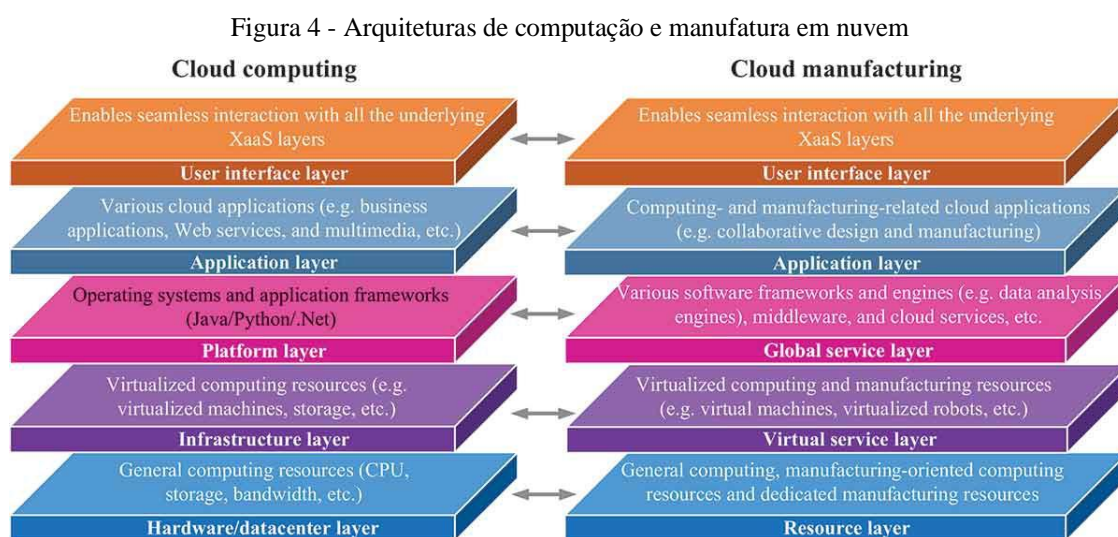
- **Computação e manufatura em nuvem**

A infraestrutura computacional também tem evoluído para atender as demandas por um acesso confiável e ágil a uma quantidade expressiva de dados (XU, 2012). Nesta tendência, temos a chamada computação em nuvem (do inglês, *cloud computing*) que pode ser entendida como a prática de usar uma rede de servidores remotos hospedados na *Internet* para armazenar, gerenciar e processar dados, ao invés de um computador pessoal ou servidor local (FURHT, 2010).

A computação em nuvem representa uma mudança de paradigma de negócios e na infraestrutura de TI, onde a capacidade de computação, armazenamento de dados e serviços são terceirizados para terceiros e disponibilizados como *commodities* para empresas e clientes (XU, 2012). Essa mudança de paradigma está intimamente interligada com o movimento de transformação digital representado pela sigla XaaS, do inglês, “*Everything as a Service*”, isto é, “Tudo como um Serviço”. Plataformas, *softwares* e outros elementos de infraestrutura de tecnologia da informação hoje são

oferecidos pela *internet* como serviços integrados e não entendidos como produtos individuais.

A extensão do conceito de *cloud computing* para o ambiente industrial é chamado de manufatura em nuvem (*cloud manufacturing*) (XU, 2012). Este novo paradigma usa a *internet*, computação em nuvem e outras tecnologias da Indústria 4.0 para transformar recursos em serviços de manufatura, que podem ser gerenciados e operados de forma inteligente e unificada para permitir o compartilhamento total de recursos e capacidades de manufatura (ZHANG et al., 2014). A Figura 4 relaciona as arquiteturas de computação e manufatura em nuvem.



Fonte: Liu et al. (2019)

A manufatura em nuvem permite a agregação dos recursos de manufatura distribuídos (por exemplo, ferramentas de *software* de manufatura, equipamentos de manufatura e recursos de manufatura) e acesso de rede onipresente, conveniente e sob demanda a um *pool* compartilhado de serviços de manufatura configuráveis que podem ser rapidamente provisionados e liberados sem muito esforço de gerenciamento ou interação entre a operadora e o provedor dos serviços (LIU et al., 2019a).

- **Sistemas inteligentes de controle da produção, MES, SCADA e ERP**

Sistemas de controle inteligentes são aqueles que fornecem informações em tempo real sobre o que está acontecendo no chão de fábrica. Esta tecnologia é uma ponte de informações entre os sistemas de planejamento usados na gestão estratégica da

produção (como ERP) e o controle de supervisão do chão de fábrica (CHIARINI; KUMAR, 2020)

Estes sistemas envolvem a aplicação de logística inteligente dentro da fábrica, por exemplo, por meio de unidades móveis autônomas (AGVs) e diferentes tipos de controladores de produção ou processo (SCADA, controladores lógicos programáveis (CLP) e sistemas digitais de controle distribuído (SDCD)), para adquirir dados de nível de máquina e processo. Esses tipos de sistemas de controle que se comunicam entre si e com um sistema de controle central podem assumir a forma de um sistema de execução de manufatura (MES). Em uma camada acima disso, a integração de MES e sistemas inteligentes de planejamento de recursos empresariais (*smart* ERP) facilita a transparência completa das informações, bem como a conectividade aos dados de negócios em tempo real (GÓMEZ PAREDES et al., 2020).

O ERP inteligente, juntamente com procedimentos de mineração de dados, possibilitaria modelos de *digital twins*, que fornecem uma representação digital do comportamento passado e atual de um único objeto até de todo o sistema de manufatura, recurso que pode contribuir significativamente para o desenvolvimento da fábrica inteligente (GHOBAKHLOO, 2018)

Os dados coletados pelas máquinas de produção são alimentados em unidades de controle físico por meio de um SCADA ou sistemas semelhantes. Com a conectividade aprimorada dos sistemas de produção, essas informações podem ser transmitidas para centros de processamento com maior capacidade, dotando os sistemas de suporte à decisão de dados, que tradicionalmente são restritos a níveis de controle e, assim, tornam-se úteis para os CPS (ROSSIT; TOHMÉ; FRUTOS, 2019a).

Programas MES/SCADA podem fazer interface com as tecnologias inteligentes instaladas nas máquinas, estações de trabalho e equipamentos de logística. Por exemplo, podem coletar dados relevantes das máquinas para calcular a eficácia geral do equipamento (*Overall Equipment Effectiveness* - OEE) e outros indicadores-chave, bem como melhorar a programação do processo de produção. Em particular, dados relacionados a paradas de estação de trabalho, filas de WIP, tempos de ciclo e presença ou ausência de trabalhadores podem ser coletados e utilizados. Desta forma, sistemas de PCP podem lidar com a capacidade finita de forma precisa e em tempo real, evitando gargalos e sobrecargas. O módulo MES/SCADA deve ser integrado aos sensores instalados nas máquinas, bem como aos processos de produção e logística (CHIARINI; KUMAR, 2020).

Para Haberli, Oliveira e Yanaze (2019), os sistemas ERP têm sido fundamentais na operação e gestão das cadeias de abastecimento, com integração contínua de processos, acesso a dados em tempo real e atualizados para manter a competitividade nos mercados global e local. Os sistemas ERP são definidos como soluções completas, que buscam integrar processos e funções em uma visão holística do negócio a partir de uma única arquitetura de TI e informação. Ele pode ser visto como um sistema integrado para automatizar o fluxo de materiais, informações e recursos financeiros, usando um fluxo de informações compartilhado combinando processos de negócios. Ainda, estes sistemas fornecem uma análise integrada dos processos envolvidos de fornecedores a clientes - em um sistema integrado com dados compartilhados e visibilidade.

Em particular, máquinas integradas com sistemas MES e ERP podem comunicar imediatamente anomalias ou quebras, bem como calcular KPIs (*Key Performance Indicators*) em tempo real (CIANO et al., 2021). Os vários subsistemas de informação dentro da organização são conectados ao sistema ERP. Isso permitirá um sistema de manufatura flexível e reconfigurável. Essa integração resulta em máquinas inteligentes dentro da organização configurando-se de forma autônoma para se adaptar a diferentes produtos (SONY, 2018).

De fato, alguns autores consideram os sistemas ERP como a base para operações de manufatura inteligentes ainda que algumas empresas pareçam ser avessas a fazer a transição para um PCP mais inteligente por meio de seus sistemas ERP (OLUYISOLA; SGARBOSSA; STRANDHAGEN, 2020).

Para gerenciar o sistema ERP de forma dinâmica, ou seja, em um cenário de informações em tempo real, o CPS é conectado pela IoT por meio de RFID. RFID fornece informações em tempo real dos parâmetros relacionados à programação da produção, incluindo *lead time* dos fornecedores, níveis de WIP, tempo de *setup*, carga de trabalho e tempo ocioso, e também reúne os dados associados com o ambiente externo como volume e variabilidade da demanda e tamanho de pedido (DEV; SHANKAR; SWAMI, 2019).

Os sistemas ERP podem enriquecer as implementações da Indústria 4.0, especialmente com os seguintes benefícios (OZTEMEL; GURSEV, 2020): análise de dados em tempo real e a indicação precoce de casos excepcionais, transparência de compras e vendas por meio de regras automatizadas e agregação e otimização de dados de forma centralizada para tratar qualquer tamanho de lote.

- **Aprendizagem de máquina e Inteligência Artificial**

A inteligência artificial (IA) usa computadores e máquinas para imitar as capacidades de resolução de problemas e tomada de decisão da mente humana. A IA amplia as capacidades de automação de processos ao criar sistemas capazes de executar tarefas cognitivas, mais complexas, sem intervenção humana.

Um dos ramos mais importantes da IA é o de aprendizado de máquina (AM) aquele que lida com métodos para dar a uma máquina a capacidade de "aprender", ou seja, melhorar o desempenho em tarefas específicas, com base na experiência anterior ou em dados fornecidos. As aplicações de IA vem avançando à medida que há quantidade de dados suficiente para que algoritmos de aprendizado de máquina consigam índices de acerto adequados. Entre as principais técnicas de AM podemos citar a regressão, a classificação, a clusterização e as redes neurais/aprendizado profundo (SARKAR; BALI; SHARMA, 2018).

Os benefícios mais significativos do uso de IA e AM em setores industriais incluem maior inovação, otimização de processos e de recursos e melhoria da qualidade (CIOFFI et al., 2020). Helo e Hao (2021) levantam alguns pontos que ajudam a esclarecer estes benefícios. Primeiramente, IA pode ser empregada para realizar atividades que antecedem a tomada de decisão de um humano como filtrar documentos e fazer previsões. Um único decisor pode atender a um número muito maior de casos e cuidar de problemas mais complexos. Um segundo ponto é a redução da necessidade de recursos humanos em cada vez mais tarefas, em especial as de *back-office*. Por fim, a IA pode fornecer orientação quase em tempo real para humanos sobre como melhorar a configuração atual das operações.

- **RFID, QR code, código de barras e GPS para identificação e rastreamento**

Para atender ao nível de precisão na identificação e rastreamento de itens em fábricas inteligentes e na rede de suprimentos em um ambiente de Indústria 4.0, os chamados sistemas de localização em tempo real como RFID, QR Code e GPS são necessários (CHUNG-HAO HUANG et al., 2015). Assim como a IoT, essas tecnologias auxiliam na intercomunicação dos sistemas e geração de dados com a diferença de que aqui a conexão ocorre no nível de componentes, enquanto a IoT ocorre no nível de sistemas (ZAFARZADEH; WIKTORSSON; BAALSRUD HAUGE, 2021). Na área de

Gestão de Operações, destacam-se as aplicações destas tecnologias em Logística e Gestão da Cadeia de Suprimentos pelos benefícios do rastreamento para transporte e armazenamento de produtos (MONSREAL et al., 2011).

RFID é um acrônimo vindo do inglês para "identificação por radiofrequência" e refere-se a uma tecnologia pela qual os dados digitais codificados em etiquetas especiais são capturados por um leitor por meio de ondas de rádio (ELBASANI; SIRIPORN; CHOI, 2020). RFID é semelhante ao código de barras, pois os dados das etiquetas são capturados por um dispositivo que armazena os dados em um banco de dados (CHUNG-HAO HUANG et al., 2015). RFID, no entanto, tem várias vantagens sobre os sistemas que usam *software* de rastreamento de ativos de código de barras como a possibilidade de leitura de objetos fora da "linha de visão" do *scanner*, enquanto os códigos de barras devem ser alinhados com um *scanner* óptico. Os sistemas RFID são amplamente aplicados nas indústrias atuais por reduzir custos e aumento de confiabilidade e desempenho (ELBASANI; SIRIPORN; CHOI, 2020).

Um *QR code* é um tipo de código de barras que pode ser lido facilmente por um dispositivo digital e que armazena informações como uma série de pixels em uma grade quadrada (TKACHENKO et al., 2016). Os *QR code* são frequentemente usados para rastrear informações sobre produtos em uma cadeia de suprimentos (DEY et al., 2021). Como muitos *smartphones* têm leitores QR integrados, eles são usados frequentemente em campanhas de *Marketing* e publicidade. Uma possível aplicação em manufatura desta tecnologia é para acompanhamento no nível de WIP e de *buffers* no sistema (ZAFARZADEH; WIKTORSSON; BAALSRUD HAUGE, 2021).

A última tecnologia de rastreamento abordada aqui é o GPS, sigla da tradução em inglês de Sistemas de Posicionamento Global. GPS é um sistema de posicionamento, navegação e tempo baseado em satélites desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos EUA (PARKINSON; GILBERT, 1983). Resumidamente, o GPS usa a posição precisa dos satélites e dos relógios atômicos a bordo para gerar mensagens que são continuamente transmitidas de cada um dos satélites (MCNEFF, 2002). Essas mensagens podem ser recebidas e processadas por usuários em qualquer lugar do mundo para determinar a posição e o tempo com precisão de alguns metros e alguns nanossegundos, respectivamente (PARKINSON; GILBERT, 1983).

Assim como outras tecnologias da Indústria 4.0, o GPS já era amplamente aplicado em manufatura e está sendo adaptado para a nova realidade de sistemas ciberfísicos, *big data* e fábricas inteligentes (MAISANO et al., 2008). Neste sentido,

especialmente para a manufatura, a tecnologia de GPS *indoor* cumpre um papel importante no fornecimento de dados para acompanhamento do movimento de funcionários, recursos móveis e materiais dentro nas instalações (SYBERFELDT et al., 2016).

- **Dispositivos móveis, como tablets, *smartphones* e *smartwatches***

No grupo de tecnologias voltadas a digitalização da manufatura, podemos citar a computação móvel que facilita o acesso à computação no processo produtivo por seu transporte facilitado (BARATA; RUPINO DA CUNHA; STAL, 2018). *Smartphones*, *tablets* e outros dispositivos móveis, permitem levar os benefícios da computação e de suas múltiplas funções a locais que antes eram inacessíveis (GORECKY et al., 2014). Uma classe desses dispositivos que vem ganhando destaque são os *wearables*, dispositivos eletrônicos que podem ser vestidos ou usados como acessórios, como, por exemplo, os relógios inteligentes (RODA-SANCHEZ et al., 2019). Os avanços em automação não eliminarão totalmente a presença humana na indústria e este tipo de acessório pode ampliar as capacidades humanas criando uma relação simbiótica produtiva entre homens e tecnologia (KONG et al., 2019). Assim, estes dispositivos podem auxiliar um trabalhador na execução de tarefas específicas ou para medir os parâmetros de saúde ao trabalhar em ambientes perigosos (SVERTOKA et al., 2021).

As tecnologias móveis têm identificação clara com a ideia de IoT por serem dispositivos que trocam informações entre si pela *internet*. Conforme definido anteriormente, estas tecnologias podem ser rotuladas como objetos inteligentes por apresentarem esta interconectividade com a adição de poderem ser transportados facilmente (BORGHETTI et al., 2020). Além da relação entre objetos inteligentes, cada dispositivo móvel pode estar vinculado aos sistemas integrados das organizações como o ERP, apoiando a tomada de decisão (ZÖLLER et al., 2014).

Na indústria, esses dispositivos coletam dados em tempo real, rastreiam atividades, fornecem alertas e fornecem experiências personalizadas de acordo com as necessidades dos usuários e objetivos organizacionais (GORECKY et al., 2014). Outra aplicação usual de *smartphones* e outros *wearables* é o reconhecimento de gestos e movimentos com o uso de acelerômetros (RODA-SANCHEZ et al., 2019).

- **Sistemas integrados de engenharia para desenvolvimento de e fabricação de produtos**

Tanto os sistemas integrados de engenharia quanto as ferramentas para projeto e fabricação auxiliados por computador são considerados sistemas de integração na interface entre o produto e os processos operacionais. Sistemas como CAD, CAE e CAM evoluíram, integrando sistemas de suporte de TI para troca de informações no desenvolvimento e fabricação de produtos (OLIVEIRA et al., 2020). Este tipo de sistema tem um papel importante na quarta evolução, pois permitirá redesenhar, simular e monitorar os modelos a serem produzidos sem a necessidade de parar uma linha de produção.

Segundo Yang et al. (2018), no âmbito da manufatura, sistemas computacionais sempre desempenharam um papel vital em levar ideias de produtos do conceito à realidade. A capacidade dos sistemas CAM de reduzir o tempo necessário para projetar e prototipar, sem necessidade de reconfigurar ou reequipar a linha de manufatura, disseminou muito seu uso na indústria. O CAM agora está assumindo um papel mais amplo em todas as operações de uma fábrica, incluindo planejamento, gerenciamento, transporte e armazenamento. Os desenvolvimentos tecnológicos tornam isso possível pela combinação da captura de dados, CAD e CAM.

A estrutura de uma fábrica inteligente geralmente requer que as máquinas tenham um processo de rede, em que o produto seja capaz de modificar o processo, se necessário, formando linhas de produção flexíveis. Modificações realizadas por CAD/CAM *online*, de acordo com cada produto específico, permitem alto nível de customização do produto. Este é um grande passo na indústria de manufatura que permitirá otimizar os recursos da empresa e dos fornecedores da cadeia de suprimentos, ao mesmo tempo em que oferece aos clientes um produto completo de qualidade e que se adapta facilmente às necessidades da sociedade atual (DALENOGARE et al., 2018).

A manufatura auxiliada por computador se beneficiará com o desenvolvimento de sistemas inteligentes, oferecendo maior garantia de qualidade com mais eficiência. Segundo Fatorachian e Kazemi (2018), as empresas que adotam prototipagem rápida e impressão 3D e sistemas integrados de engenharia, desenvolvimento de produtos e fabricação podem observar tempos de *setup* mais baixos devido a uma redução na complexidade por modularização. Para viabilizar esses benefícios, novos princípios de



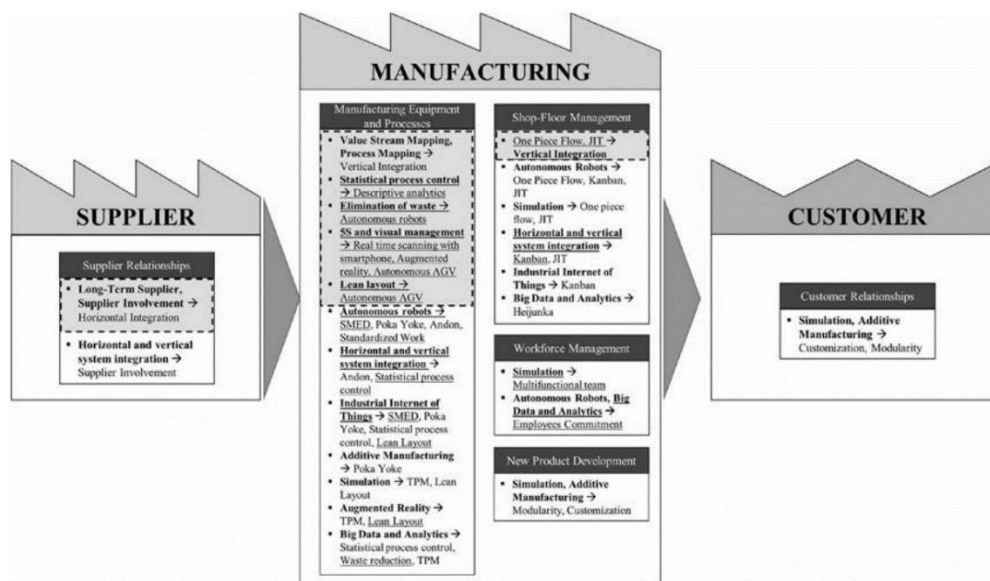
*design* serão necessários e as tecnologias emergentes terão um impacto profundo na fabricação auxiliada por computador e seu papel no futuro.

Para Cohen et al. (2019), redes e processos estão se ampliando de serem aplicados em fábricas individuais para um cenário de conexão completa com outras organizações e pessoas. A manufatura auxiliada por computador, assim, ficará cada vez mais conectada em rede com produtos, recursos, e mesmo clientes. Com o monitoramento e o diagnóstico de falhas, os componentes e os sistemas se autodiagnosticam, fornecendo mais informações sobre o *status* do processo e fornecendo soluções flexíveis a serem aplicadas no CAD/CAM. A manufatura auxiliada por computador e a IoT exigirão coordenação em toda a cadeia de valor, do desenvolvimento de produto até o gerenciamento de produto, manufatura e montagem e para o fornecimento de serviços digitais.

#### 2.1.2. PCP e o suporte das tecnologias da Indústria 4.0

Recentemente, foi publicada uma revisão sistemática a respeito do conceito de PCP inteligente no contexto da Indústria 4.0 (BUENO; GODINHO FILHO; FRANK, 2020). No artigo, capacidades inteligentes são identificadas para cinco grupos tecnológicos (IoT, CPS, manufatura aditiva, manufatura em nuvem e análise de *big data* e IA), com relação a diversas atividades de PCP. Já o trabalho de Ciano et al. (2021) apresenta diversos usos de tecnologias da Indústria 4.0 para ferramentas e práticas do *Lean Manufacturing*. A Figura 5 apresenta o resumo dos resultados deste estudo. Importante destacar que para os autores a literatura sobre o efeito da Indústria 4.0 na produção *lean* é mais rica do que encontrada no sentido contrário. Parte dos resultados dessas publicações tem paralelo com os usos potenciais apontados na presente pesquisa e serão mencionados e complementados nessa seção.

Figura 5 - Relações entre as técnicas de produção enxuta e as tecnologias da Indústria 4.0



Fonte: Ciano et al. (2021).

Tecnologias voltadas à coleta e análise avançada de dados apresenta capacidades importantes para o PCP. O processo de previsão e análise de dados podem ser apoiados por ferramentas baseadas em soluções de *big data* e inteligência artificial. Essas tecnologias são usadas para prever a necessidade de recursos, melhorando a precisão e o desempenho da previsão, processando grandes volumes de dados e fazendo a análise usando métodos de aprendizado de máquina, seleção automática de preditores de demanda, coleta de dados em tempo real e monitoramento e diagnóstico. Ferramentas de análise de dados são usadas para integração da previsão de demanda com a gestão da capacidade e estoque (BUENO; GODINHO FILHO; FRANK, 2020).

Entre as áreas críticas para a programação da produção no contexto da Indústria 4.0, cita-se que os CPS podem permitir a programação otimizada *online*, em tempo real e reativa, além de uma programação holística, incluindo níveis de decisão hierárquicos mais elevados no processo de programação. Porém, deve-se levar em conta um contexto de programação sob incerteza, com dados incompletos e ausentes. O uso de IoT também deve permitir um processo de tomada de decisão descentralizado e autônomo e maior flexibilidade na programação (PARENTE et al., 2020).

O uso de IoT e modelagem e simulação para programação integrada de produção-entrega tem potencial de reduzir tempos de entrega. Simulação ainda capacita o JIT, pois permite testar e otimizar rotas de AGV, por exemplo (HELO; HAO, 2021).

Rosin et al. (2020) descobriram que a capacidade da simulação para detectar gargalos garante o fluxo contínuo do JIT. A simulação também pode ser usada para a identificação de parâmetros Kanban ideais como estoque, frequência de entrega e tamanho do lote.

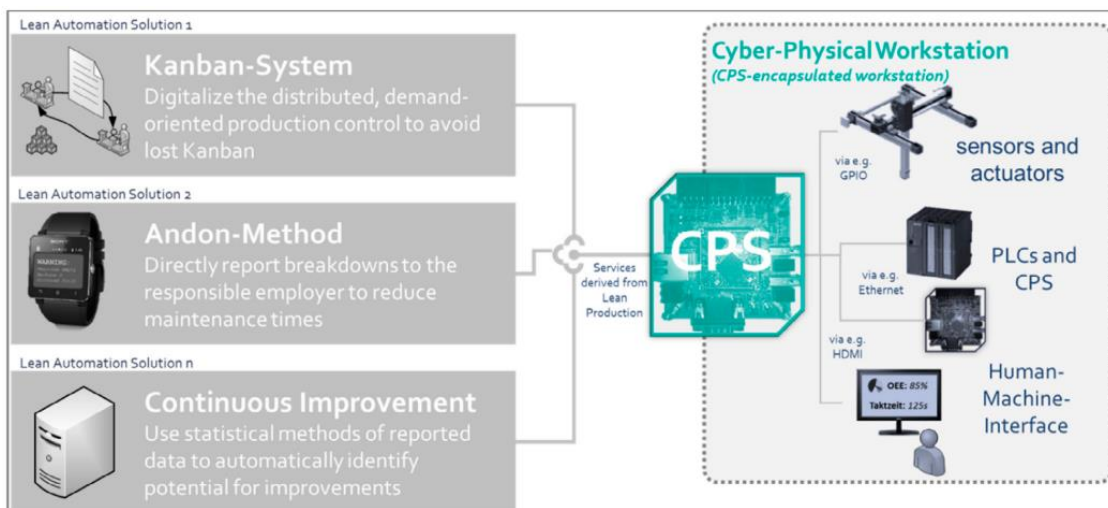
Com relação à tecnologia de IoT, seu uso para a programação da produção e controle do chão de fábrica permitiria a coleta e mineração de dados em tempo real via sistemas APS (*advanced planning and scheduling*), bem como o monitoramento em tempo real dos planos de produção. Outras capacidades da IoT envolvem como programação inteligente, monitoramento de recursos em tempo real, programação dinâmica distribuída e adaptável, sincronização no controle de chão de fábrica (BUENO; GODINHO FILHO; FRANK, 2020).

A IoT também está sendo amplamente aplicada no *lean*, visto que é essencial para recuperar informações, identificação e atribuição de espaços, materiais, peças e ferramentas. Há indicações de que IoT pode ser aplicado no processo de VSM, por meio de dados coletados em tempo real. O fluxo contínuo JIT e a estratégia puxada/Kanban são garantidos pela capacidade da IoT de rastrear produtos em tempo real e enviar atualizações de progresso instantâneas. *Big data* e *data analytics* também já foram aplicados em JIT, para análise de informações do processo em tempo real, fornecendo insights sobre parâmetros, tendências e regras para o sistema de produção (TORTORELLA et al., 2020).

Alguns paralelos entre tecnologias da Indústria 4.0 e ferramentas *lean* foram feitos na literatura. Por exemplo, impressoras 3D podem ser consideradas uma nova forma de Kanban, pois podem intervir na gestão de estoque produzindo itens JIT sob demanda (CIANO et al., 2021). Ainda, afirmam, em relação ao SMED, que a manufatura aditiva evita o tempo de preparação para seleção, busca e ajuste de peças e ferramentas (PAGLIOSA; TORTORELLA; FERREIRA, 2019). Além disso, o JIT, e especialmente o fluxo unitário, pode ser promovido por *cobots* incluídos em linhas de montagem enxutas, permitindo o aumento da capacidade de produção e, conseqüentemente, da produtividade (CIANO et al., 2021).

A Figura 6 apresenta o *framework* desenvolvido por Kolberg, Knobloch e Zühlke (2017), com soluções *lean* formatadas para o CPS. A ideia é que as ferramentas sejam integradas às tecnologias digitais, formando serviços à estação de trabalho.

Figura 6 - Soluções de *Lean Automation* para integração em estação de trabalho encapsulada em CPS



Fonte: Kolberg, Knobloch e Zühlke (2017).

Tecnologias de visualização de dados também podem ser aplicadas em atividades de PCP. A GE utiliza RA para projetar informações de produção diretamente nas peças, o que auxilia operadores a monitorar o processo em tempo real (OLSEN; TOMLIN, 2020). RA e RV também apresentam potencial de aplicação para JIT, TPM, SMED, VSM e *Poka-Yoke*. Tecnologias de RA poderiam substituir placas físicas para orientar os operadores e no uso de RV para treinar os operadores da área de manutenção (KAMBLE; GUNASEKARAN; DHONE, 2020).

Com relação ao suporte tecnológico das tecnologias da Indústria 4.0 para atividades propostas pela TOC, a literatura é escassa e foi revisada na seção 3. A maioria dos estudos versando sobre TOC e Indústria 4.0, mostram aplicações da TOC para implantação de tecnologias e não o contrário. Como alguns exemplos de soluções tecnológicas aplicadas a ambientes TOC estão o uso de simulação para tratar problemas de mix em cenário baseado no TPC (HILMOLA; GUPTA, 2015), integração de RFID com identificação de gargalos (CHOU; WANG; SHEU, 2016) e usos integrados de IoT com algoritmos baseados na TOC (BALAJI; VENKUMAR; SABITHA, 2018; SAIF et al., 2019). Estes e outros estudos serão detalhados na seção 3.

### 2.1.3. Indústria 4.0 e o ambiente de incerteza e variabilidade

Mudanças nos processos serão requeridas, devido ao advento dos sistemas ciberfísicos e das fábricas inteligentes. As funções da organização podem mudar devido à automação. Por exemplo, a indústria 4.0 dará origem a organizações descentralizadas

e a tomada de decisão se voltará para o nível do chão de fábrica (KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018). Hoje, em uma fábrica da Indústria 4.0, as máquinas são conectadas como uma comunidade colaborativa. Tal evolução requer a utilização de ferramentas de previsão avançadas, para que os dados possam ser sistematicamente processados em informações para explicar incertezas e, assim, tomar decisões mais “informadas” (LEE; KAO; YANG, 2014).

A tecnologia de *big data*, por exemplo, fornece infraestrutura para a transparência na indústria de manufatura, o que facilita a exposição das incertezas, como a inconsistência no desempenho e disponibilidade dos componentes (SHIN; CHOI, 2015). Como afirma a frase atribuída a Deming e Drucker, aquilo que não se pode medir, não se pode gerenciar. Por causa do *big data*, os gerentes podem medir e, portanto, conhecer significativamente mais sobre seus negócios e traduzir esse conhecimento em decisões e desempenho aprimorados. A análise de *big data* é muito mais poderosa e precisa do que as aplicadas no passado. Previsões melhores levam a decisões mais inteligentes e essas decisões, usualmente tomadas com base na experiência e intuição, passam a ser tomadas com base em dados e maior rigor (MCAFEE; BRYNJOLFSSON, 2012). Grandes conjuntos de dados fornecem uma forma superior de inteligência e conhecimento que pode gerar novos *insights*. As informações se transformam em conhecimentos e padrões novos e de valor, e informações reunidas de *big data* são usadas para resolver problemas, aumentar lucros e produtividade, encontrar oportunidades e desenvolver padrões de trabalho (FREDRIKSSON, 2018).

As análises de *big data*, assim como o processo com dados tradicionais, buscam extrair inteligência dos dados para suporte à tomada de decisões. O *big data* pode ser definido como grandes conjuntos de dados cujo tamanho está além da capacidade de gerenciamento de ferramentas tradicionais de processamento de dados (FREDRIKSSON, 2018). No entanto, existem três diferenças principais. Primeiramente, com relação ao volume de dados, empresas podem trabalhar com muitos *petabytes* em um único conjunto de dados, não se restringindo somente ao conteúdo da *Internet*. Outro ponto se refere à velocidade de transmissão e análise. Informações em tempo real ou quase em tempo real possibilitam que uma empresa seja muito mais ágil que seus concorrentes. Por fim, existe uma maior variedade de dados (mensagens, atualizações e imagens postadas em redes sociais, leituras de sensores, sinais de GPS de telefones celulares). *Smartphones*, *e-commerce*, redes sociais, comunicação eletrônica, GPS e

máquinas com sensoriamento produzem grande fluxo de dados como subproduto de suas operações comuns. Os dados disponíveis muitas vezes não são estruturados, não sendo organizados em um banco de dados, e são de difícil manipulação. Mesmo com muito ruído dentro dessa enorme quantidade de dados, é possível extrair informações relevantes. Inclusive, o *big data* é ao mesmo tempo mais simples e mais poderoso que as técnicas de análise tradicionais (MCAFEE; BRYNJOLFSSON, 2012).

Há uma grande variedade de ferramentas analíticas que extraem e processam *big data* em informações. Como técnicas de análise dos dados, identificam-se modelos de simulação, estatística e otimização. Essa análise pode ser descritiva, preditiva ou prescritiva. Outras, como *data mining*, *machine learning*, análise e algoritmos de redes sociais, são técnicas mais avançadas para análise de *big data* (BRINCH, 2018).

Além dos chamados três V's (volume, velocidade e variedade), a grande veracidade e valor dos dados também são citados como diferenciais da tecnologia de *big data*, apesar de não haver consenso na literatura. A variabilidade também é mencionada, dado que o *big data* pode trazer mais variância e incerteza que conjuntos tradicionais de dados. Como seu ciclo de vida é mais curto, o *big data* é mais volátil, sendo necessário verificar e validar os dados, garantindo alta transparência e que os dados sejam provenientes de processos intencionais e não gerados aleatoriamente (BRINCH, 2018). O foco principal é a complexidade dos dados e a consequente mudança no gerenciamento de dados e informações (FREDRIKSSON, 2018).

Com a ajuda de dados mais transparentes fornecidos pela indústria 4.0, os gerentes podem, por exemplo, usar a análise de *big data* para avaliar os fornecedores potenciais com base em seu desempenho histórico, o que permite que os gerentes tomem decisões finais de maneira mais autônoma. Além disso, com base na análise de *big data*, as empresas podem definir melhores indicadores de desempenho e gerenciar os fornecedores de maneira mais eficaz (DING, 2018). Usando *big data* e as técnicas existentes para analisá-lo, é possível propor novas questões e teorias não examinadas no passado, bem como para encontrar melhores respostas para as questões existentes (FREDRIKSSON, 2018). Por exemplo, as aplicações operacionais buscam incorporar *big data* nos processos, explorando dados existentes para otimização de processos, melhores práticas de gerenciamento e tomadas de decisão de forma contínua e padronizada. Melhorias nos processos de negócios e rastreamento em logística são possíveis pela maior velocidade de transmissão de dados para monitoramento de processos (BRINCH, 2018).

No que tange à incerteza nos sistemas de produção, por exemplo, em ambientes de produção *Make-to-Order*, há alta variabilidade na carga de trabalho dos pedidos a serem enviados para o chão de fábrica e fatores como customização, inovação e variedade tornam a estimação desse trabalho muito difícil. Conjuntos de dados são construídos a partir dos tempos de processamento e se aplicam métodos de controle da carga de trabalho, usando esses dados estimados, que diferem muito da realidade. No entanto, na era da indústria 4.0, com todas as oportunidades para reunir mais dados e fazer melhor uso da informação disponível, é possível fazer investimentos e reduzir a incerteza. A indústria 4.0 permite melhor controle sobre o sistema e melhora a confiabilidade das informações usadas para avaliação e liberação de pedidos, aprimorando a capacidade de prever a carga de trabalho necessária para um trabalho. Portanto, a indústria 4.0 poderia apoiar as empresas no combate à incerteza, seja reduzindo o efeito da incerteza aumentando o controle sobre o sistema ou diminuindo o nível de incerteza diretamente. No entanto, se a informação não for tão confiável e/ou o algoritmo não for robusto o suficiente, os resultados não aparecem (KUNDU; ROSSINI; PORTIOLI-STAUDACHER, 2018).

Um exemplo de aplicação de *big data* no setor público é a prefeitura da cidade de Turku na Finlândia, apresentado por Fredriksson (2018). *Big data* sobre a economia e atividade municipal é usado com o objetivo de planejar finanças, para o planejamento urbano e desenvolvimento de serviços de assistência social e saúde. Também é usado para identificar tendências de maneira mais eficiente. Com o auxílio de *big data*, os recursos humanos foram mais especificamente alocados para diferentes localidades. Também tem sido usado quando novos serviços são planejados, contribuindo para a possibilidade de mapear, por exemplo, quantas crianças estão morando em uma área específica, para justificar por que uma nova escola deve ser construída em uma determinada área. Por outro lado, uma diminuição no número de crianças pode significar que uma escola não é mais necessária. Ao combinar informações geográficas com dados de cuidados de saúde (saúde mental, tabagismo, consumo de álcool e fatores econômicos), a cidade conseguiu mapear as áreas com maiores taxas de suicídio e incidência de doenças mentais. Uma variedade de análises pode ser realizada a partir desses dados e tomadas de decisões precisas podem ser feitas. Um exemplo é a combinação de resultados de laboratório (nível de glicose no sangue) e informação geográfica, que resultou em informações sobre quantos médicos especializados em diabetes são de fato necessários nos centros de saúde.

De acordo com McAfee e Brynjolfsson (2012), apesar do desenvolvimento e crescente aplicação de *big data*, percebe-se que ainda existe resistência em se adotar uma cultura de tomada de decisões baseada em dados. Os desafios técnicos do uso da tecnologia são reais, mas os desafios gerenciais são ainda maiores, começando pelo papel da alta direção. Um dos aspectos mais críticos do *big data* é seu impacto sobre como as decisões são tomadas e quem as toma. Quando os dados são escassos, caros de se obter ou não estão disponíveis em formato digital, faz sentido deixar que as pessoas mais bem posicionadas tomem decisões, o que elas fazem por meio de opiniões baseadas na experiência que acumularam e nos padrões e relacionamentos que observaram. Para decisões particularmente importantes, essas pessoas geralmente estão no topo da organização, ou são pessoas de fora, requisitadas por sua experiência e histórico. Isso ocorre mesmo na comunidade que adota *big data*.

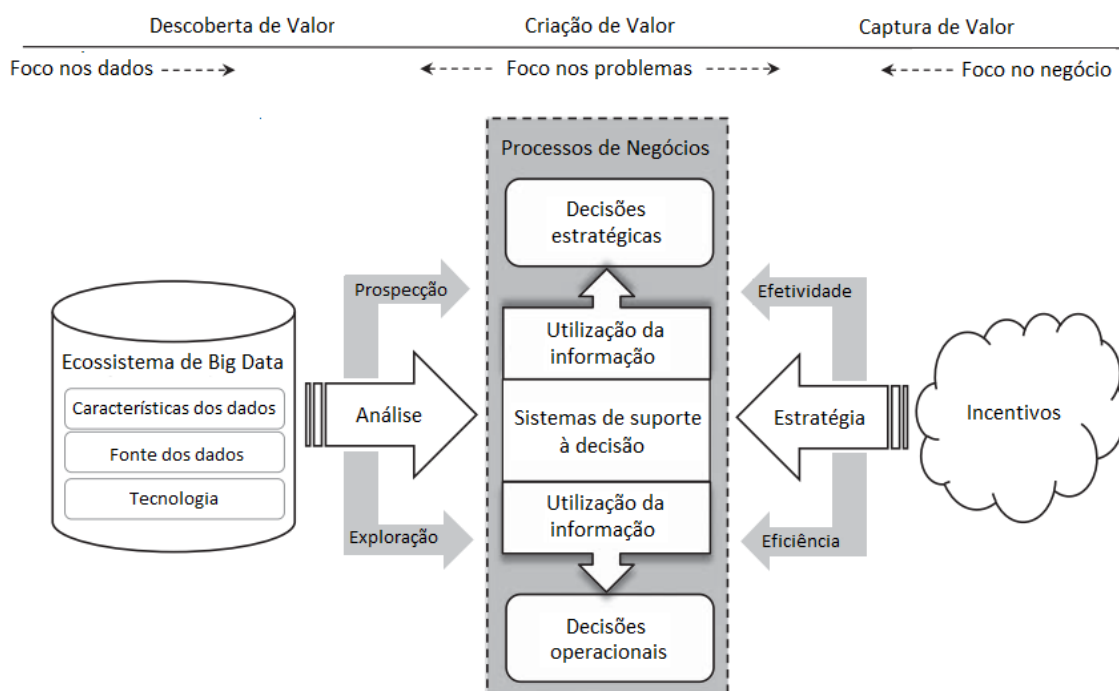
Com certeza, há muitos altos executivos orientados a dados e dispostos a se sobrepor à própria intuição quando os dados não concordam com isso. Mas, ainda assim, as pessoas ainda confiam mais na experiência e intuição que nos dados. Quanto mais dados e informação estão disponíveis, maior a necessidade de julgamento humano na tomada de decisão (FREDRIKSSON, 2018). Quando se trata de saber quais problemas abordar, o domínio em certa especialidade ainda é crítico. Os especialistas são aqueles que sabem onde estão as maiores oportunidades e desafios. Eles são valorizados não por suas respostas opinativas, mas pelas perguntas às quais são capazes de fazer. Na era do *big data*, a informação é criada e transferida, e a *expertise* está difusa em muitas áreas. As pessoas que mais compreendem os problemas precisam ser reunidas com os dados certos, mas também com as pessoas que têm técnicas de solução de problemas que podem efetivamente explorá-los (MCAFEE; BRYNJOLFSSON, 2012).

O valor fornecido pelo *big data* pode ser visualizado em três dimensões. A descoberta de valor representa a capacidade de gerar, localizar, coletar, armazenar e controlar dados confiáveis que dependem de uma rede transparente, mas complexa, de sistemas, plataformas e bancos de dados. Já a criação de valor representa o valor de uso de *big data* em processos de negócios específicos e a capacidade de utilizar as informações geradas para tomada de decisões estratégicas e/ou operacionais usando sistemas de decisão. Por fim, a captura de valor representa a realização de melhorias econômicas derivadas do *big data*, ganhos competitivos, melhor desempenho ou outros incentivos (BRINCH, 2018). A pesquisa de McAfee e Brynjolfsson (2012) evidenciou



que quanto mais as empresas se caracterizam como orientadas a dados, melhores seus resultados financeiros e operacionais. Essa diferença de desempenho se manteve tomando diferentes configurações de mão de obra, capital, serviços adquiridos e investimentos em TI. A Figura 7 apresenta o *framework* desenvolvido por Brinch (2018) sobre as formas como *big data* pode ser utilizado para fornecer valor ao dar suporte a tomadas de decisão em cadeias de suprimento.

Figura 7 - Aplicação de *big data* para suporte à tomada de decisão na gestão de cadeias de suprimento



Fonte: Adaptada de Brinch (2018).

Reunir e apresentar informações demonstra a capacidade e a legitimidade dos tomadores de decisão. Acredita-se que maior quantidade de informações resulta em melhores tomadas de decisões, e o uso de informações nas organizações mostra tentativas de tentar tomar decisões inteligentes. Como a informação é significativa para os atores tomadores de decisão, há uma questão de legitimidade ligada ao uso da informação. Usar informações e decisões justificadas por dados tornou-se uma maneira significativa de simbolizar que o processo é legítimo. Observa-se também que os gerentes preferem informações com maior riqueza, provenientes da comunicação pessoal, a informações extraídas de análise computacional (FREDRIKSSON, 2018). No entanto, não há acordo sobre se menos ou mais informações ajudam a reduzir a incerteza e as ambiguidades. De acordo com Galbraith (1974), quanto maior a incerteza

de uma atividade, maior a quantidade de informação que deve ser processada entre os tomadores de decisão, a fim de alcançar um desempenho efetivo. Fredrickson (2018) argumenta que a discussão sobre a importância do apoio de TI à decisão é independentemente de dados pequenos ou grandes. O tamanho do conjunto de dados não é relevante atualmente, mas as estruturas e modelos em torno dos dados são, ou pelo menos poderiam ser. Uma das características do *big data* é o volume, não se restringindo apenas a isso. Grande quantidade de dados não leva automaticamente à criação de valor.

Uma empresa que aplica as tecnologias da indústria 4.0 deve apresentar as propriedades mencionadas a seguir. Primeiro, deve haver automação da produção como ferramenta para aumentar a flexibilidade na fabricação. Em segundo lugar, todo componente físico do chão de fábrica e do processo de manufatura deve ter uma representação particular cibernética embutida no sistema de informação. Terceiro, uma série de sensores deve ser instalada para supervisionar e controlar o estado dos componentes físicos, processos de fabricação e ordens de produção. Em quarto lugar, deve haver uma rede adequada que facilite a comunicação entre todos os componentes físicos, bem como com os processos de fabricação e ordens de produção (KUNDU; ROSSINI; PORTIOLI-STAUDACHER, 2018).

O tratamento da incerteza em decisões de curto prazo pode ser realizado por modelos de otimização em tempo real. Usando dispositivos de transmissão de informações, os tomadores de decisão obtêm dados relevantes de diferentes entidades envolvidas em seus processos de negócios. No entanto, para utilizar os dados, são necessários métodos e algoritmos adequados para tomadas de decisão em tempo real adequados. Assim, esse tratamento das entidades físicas de uma cadeia de suprimentos a partir de algoritmos de análise de dados e de otimização *online* é o aspecto que favorece a adoção de tecnologias como a *Internet* das Coisas como uma parte importante da Indústria 4.0 (DUNKE et al., 2018).

Há evidências que empresas que enfrentam alta incerteza ambiental têm uma motivação maior para adotar tecnologias avançadas que promovam disseminação rápida e confiável de dados e cronogramas de produção. Essas são capazes de gerenciar mais eficazmente a incerteza na cadeia de suprimentos. Porém, no caso da adoção de IoT, essa relação não foi observada (ARNOLD; VOIGT, 2019). Uma possível causa seria que a incerteza percebida pelas empresas estudadas não consegue ser reduzida apenas pelo pela melhoria do fluxo de informação proporcionado pela IoT. Alguns praticantes

que aplicam *big data* inclusive destacam que o maior volume de dados não simplifica a tomada de decisões, mas torna o processo mais complicado, e que o *big data* poderia ser apenas uma das muitas fontes de decisão. É importante estar ciente de que tipo de informação é necessária para decisões específicas e como os dados devem ser gerenciados para utilizá-los adequadamente. Além disso, se os tomadores de decisão não confiam na informação disponível ou há incerteza sobre a relevância da informação, ela pode levar a um grau ainda maior de incerteza e dificultar ainda mais a tomada de decisões (FREDRIKSSON, 2018).

Apesar de a tecnologia ter avançado, os métodos de PCP em uma fábrica inteligente não necessariamente acompanham essa evolução. Muito pelo contrário, as teorias de tomada de decisão de forma antecipada, em tempo real ou quase real, e a otimização *online* ainda não estão consolidadas, e uma abordagem sistemática de otimização sob incerteza quase em tempo real ainda não está estabelecida. A razão principal para isso pode ser a dificuldade em encontrar um conceito adequado de otimalidade que possa ser aplicado na tomada de decisões a partir de informações incompletas (DUNKE et al., 2018).

Muitos modelos de planejamento de múltiplos períodos, no contexto de cadeias de suprimentos, podem, por exemplo, tomar as decisões “congelando” os períodos passados. Nesse caso, o modelo é usado para planejar o futuro “restante”, mas as decisões a serem tomadas devem levar em conta o que já foi implementado. Ao fazer isso, obtém-se um modelo que é capaz de reagir às decisões anteriores, considerando informações novas ou mais precisas disponibilizadas no meio tempo. Essa é uma situação típica em que novas tecnologias (por exemplo, sensores) podem ser usadas para ajustar a informação disponível e, assim, reduzir gradualmente a incerteza. Quando decisões operacionais estão envolvidas, este procedimento é conhecido como planejamento de horizonte móvel (DUNKE et al., 2018).

Além das tecnologias de informação empregadas na Indústria 4.0, importante ressaltar que novos processos de fabricação, como a manufatura digital direta, manufatura aditiva ou impressão 3D, podem isolar a variabilidade associada à produção de peças de baixo volume. A introdução desses processos pode atenuar a variabilidade de produção de fabricantes com produtos heterogêneos, com estrutura complexa, melhorando, assim, a eficiência na produção em massa (SASSON; JOHNSON, 2016). Ademais, a quarta revolução industrial leva a sistemas de produção integrados vertical e horizontalmente. As fábricas inteligentes são capazes de atender às demandas dinâmicas

dos clientes com alta variabilidade em lotes pequenos, ao mesmo tempo em que integram engenhosidade humana e automação (THOBEN; WIESNER; WUEST, 2017).

## **2.2. FUNDAMENTOS DA TEORIA DAS RESTRIÇÕES E APLICAÇÃO PARA PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO**

A fundamentação teórica sobre TOC está dividida em uma seção inicial, que discute o histórico e princípios básicos da teoria (2.2.1.), uma apresentação do TPC, TPC-S e GP, com suas principais atividades e ferramentas (2.2.2.) e uma discussão sobre a implantação de novas tecnologias sob a perspectiva da TOC (2.2.3).

### **2.2.1. Origem e princípios básicos da TOC**

A TOC é uma abordagem de gestão inicialmente formulada por Eliyahu M. Goldratt na década de 80 (IKEZIRI et al., 2019). Goldratt iniciou o desenvolvimento da TOC quando trabalhava na desenvolvedora *Creative Output*, onde colaborou na criação do *software* OPT. A lógica por trás do OPT foi introduzida no best-seller *A Meta* (GOLDRATT; COX, 1990), escrito na forma de romance. O romance apresenta a abordagem particular da TOC, usada no desenvolvimento de suas técnicas específicas de gerenciamento. O protagonista, Alex Rogo, salva a fábrica que dirige, com a ajuda de algumas perguntas dirigidas por seu mentor, Jonah. *A Meta* descreve várias heurísticas e técnicas que se tornaram a base da prática em TOC. Em sua forma mais básica, o romance delinea também os cinco passos de focalização (*Five Focusing Steps* - 5FS), o processo pelo qual os conceitos de TOC são implementados. Os passos são (GOLDRATT; COX, 1990): 1 - Identificar a(s) restrição(ões) do sistema; 2 - Explorar a(s) restrição(ões) do sistema; 3 - Subordinar tudo o mais à decisão anterior; 4 - Elevar a(s) restrição(ões) do sistema; 5 - Se em um passo anterior uma restrição tiver sido quebrada, volte ao passo 1.

Desde então, Goldratt e outros colaboradores expandiram as aplicações dos fundamentos para outras áreas da gestão como gestão de projetos, finanças e gestão da cadeia de suprimentos (DE JESUS PACHECO; ANTUNES JUNIOR; DE MATOS, 2020). Hoje, a TOC engloba uma ampla gama de conceitos, princípios, soluções, e ferramentas a fim de garantir que qualquer mudança realizada como parte da melhoria contínua irá beneficiar o sistema como um todo.

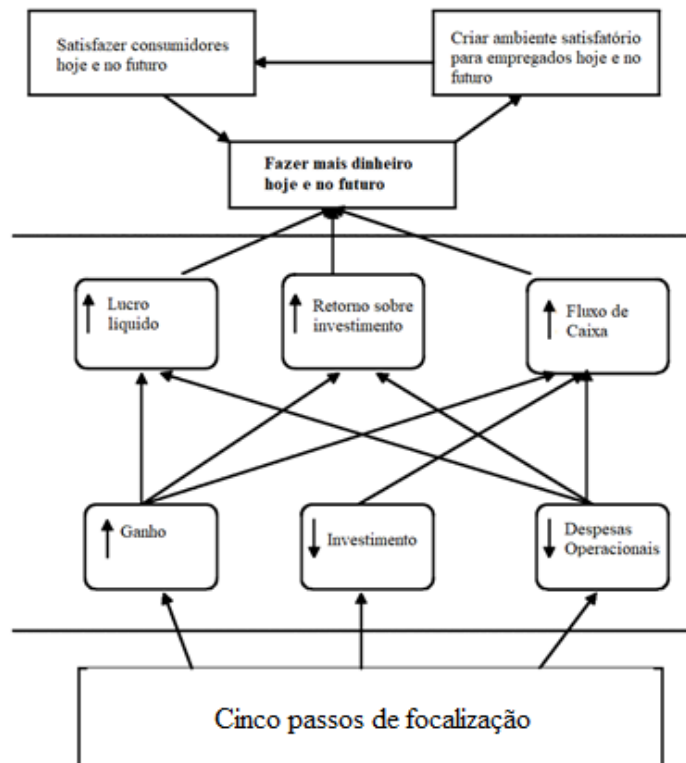
Alguns princípios permitem descrever a base intelectual da TOC (ALMEIDA et al., 2018). O primeiro princípio é chamado de Simplicidade Inerente que é a compreensão de que sistemas complexos interligadas por diversas relações de causa e efeito são governados por poucas destas causas. O foco do aprimoramento dos sistemas deve estar nestas causas fundamentais. O segundo princípio, chamado de Harmonia, é a crença de que contradições não podem existir e se duas interpretações da realidade estão em conflito, somente uma delas será verdadeira. O princípio do Respeito é o entendimento de que as pessoas são racionais e de que suas decisões são baseadas em lógica. Assim, o foco da gestão não deve estar em culpar pessoas, mas sim em encontrar as premissas errôneas que estão desencadeando os comportamentos indesejados. O último princípio, o do Potencial Inerente, estipula que qualquer situação é passível de melhorias substanciais.

Para executar esses princípios, a TOC se baseia na mudança da cultura e mentalidade da organização, de suas medidas de desempenho e dos métodos empregados (GUPTA; KO; MIN, 2002). A mentalidade da organização deve estar direcionada ao objetivo final que, no caso de organização com fins lucrativos, é “fazer mais dinheiro” (GUPTA et al., 2010). A TOC sugere, em sua chamada Contabilidade de Ganhos (*throughput accounting*), três medidas fundamentais para gerar os incentivos corretos (MARQUES; CIA, 1998): ganho (*throughput*), que é o dinheiro gerado pela organização em um período; investimentos, que são os recursos (ativos) empregados na geração de ganho; despesas operacionais, que são os custos decorrentes do processo que não sejam totalmente variáveis, ou seja, que não aumentem ou diminuam proporcionalmente à variação de produção.

Um conceito fundamental para a TOC é o de restrição. Restrição pode ser compreendido como aquilo que limita o desempenho de um sistema (GUPTA; BOYD, 2008). Uma empresa não consegue gerar lucros infinitos e o que a impede são as restrições. Para a TOC, o processo de melhoria de um sistema deveria estar focado no gerenciamento destas restrições, indicando para a organização “o que mudar” e “como mudar” (WATSON; BLACKSTONE; GARDINER, 2007). O processo de melhoria da TOC pode ser resumido em cinco passos (WU; ZHENG; SHEN, 2020): identificar a restrição, explorar a restrição, subordinar todos os pontos do sistema à restrição, elevar a restrição e evitar que a inércia se torne a restrição. A Figura 8 apresenta um *framework* que resume a visão da TOC ao integrar os passos de focalização com as medidas da

Contabilidade de Ganhos e medidas financeiras tradicionais, a fim de atingir o objetivo principal da organização.

Figura 8 - *Framework* integrado da TOC



Fonte: Gupta, Ko e Min (2002).

Apesar de se basearem nos mesmos princípios e conceitos, cada área de aplicação apresenta suas especificidades. Blackstone (2001) e Ikeziri et al. (2018) elencam as seguintes áreas de aplicação da TOC: operações/produção, finanças e medição, processo de pensamento, distribuição e cadeias de suprimentos, *Marketing*/vendas, gestão de pessoas e processo de melhoria contínua.

Com o objetivo de apoiar a execução dos 5FS para esta ampla variedade de aplicações, Goldratt desenvolveu um conjunto de ferramentas lógicas para estruturar os problemas metodicamente e resolver conflitos nos sistemas, as chamadas ferramentas dos Processos de Raciocínio ou *Thinking processes* (TP) (SCHEINKOPF, 2010). Exemplos de ferramentas clássicas do TP são a árvore da realidade atual, diagrama de dispersão de nuvem, árvore da realidade futura, ressalva do ramo negativo, árvore de transição, árvore de pré-requisitos e a árvore de estratégia e táticas (S&T) (MATEEN; MORE, 2013). As árvores S&T são usadas para definir e comunicar todas as mudanças necessárias e suficientes para sincronizar ações para a realização de qualquer objetivo,

bem como a sequência de implementação (COX et al., 2012). Uma S&T bem escrita pode fornecer a uma organização a capacidade de atingir níveis de comunicação, sincronização e desempenho elevados, por meio de uma sequência de níveis lógicos em cascata que detalham as ações necessárias (SCHEINKOPF, 2010).

Outra ferramenta importante quando se analisa a efetividade de mudanças no sistema é a *Árvore da Realidade Futura (Future Reality Tree – FRT)*. A FRT, como o próprio nome sugere, é uma árvore que permite visualizar o estado futuro do sistema. Uma FRT é uma estrutura lógica que permite a uma pessoa construir uma solução que, quando implementada, elimina os efeitos indesejáveis (LOWALEKAR; RAVI, 2017).

As aplicações mais reconhecidas de TOC, por sua origem já descrita, se encontram no PCP. O método ilustrado no livro *A Meta* é chamado de *Tambor-Pulmão-Corda*, sendo assim nomeado pelos elementos constituintes desta abordagem (THÜRER et al., 2017a). O Tambor representa a restrição e sua programação. Pulmão é uma proteção, geralmente, de tempo ou equivalente em tempo, que garante que o sistema não sofra atrasos mesmo com variabilidades. Já a Corda é o canal de comunicação que subordina a criação de ordens de produção ao ritmo de produção estabelecido pelo Tambor. Este método foi atualizado para uma versão simplificada (TPC-S), com mudanças que o adequam à premissa de que se espera que o mercado seja a principal restrição do sistema (LEE et al., 2010). As atividades componentes do TPC e TPC-S são o foco de investigação no presente trabalho e serão detalhadas na Seção 2.2.2.

A fim de gerenciar a restrição de mercado, a TOC também apresenta alternativas baseadas em seus conceitos para a área de *Marketing* e vendas. A solução da TOC para esta área está centrada no conceito de *Mafia Offer*, também conhecido como *Unrefusable Offer*. Lang (2010) define este conceito como uma oferta tão boa que os clientes não podem recusá-la e que os competidores não conseguem oferecer algo equivalente. A ideia, portanto, é elevar o valor percebido do produto ou serviço oferecido, encontrando soluções heterodoxas para as causas principais dos problemas deste cliente (LOWALEKAR; BASU, 2020).

Uma expansão natural das ideias que baseiam os métodos TPC e TPC-S é sua aplicação em toda a cadeia de suprimentos. A solução da TOC para a gestão da cadeia é baseada na lógica da distribuição puxada, que tem como premissas a reposição de estoques com base no consumo real e a agregação de estoques na fonte (fábrica ou armazém) (MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019). Assim como na aplicação para produção, o uso e controle de pulmões no sistema protege o sistema de escassez de

produtos, mesmo com níveis mais baixos de estoque do que em outros métodos de gestão (SIMATUPANG; WRIGHT; SRIDHARAN, 2004).

A aplicação da TOC para a Gestão de Projetos é chamada de Gerenciamento de Projetos por Corrente Crítica ou *Critical Chain Project Management (CCPM)*, por seu foco na cadeia principal de atividades de um projeto que define seu tempo de conclusão (GOLDRATT, 1997). A CCPM busca lidar com os vieses cognitivos que fazem com que os projetos não cumpram seus prazos e gastem mais recursos que seu orçamento (LUIZ et al., 2019).

A fim de mensurar o desempenho de sistemas adequadamente, sem gerar maus incentivos às pessoas envolvidas no processo, a TOC define uma abordagem própria para contabilidade rotulada de Contabilidade de Ganhos ou *Throughput accounting (TA)*. Os princípios principais desta abordagem são (DUGDALE; JONES, 1998):

- A taxa de geração de lucros da fábrica deve ser considerada e não de recursos individuais.
- As diferenças entre custos diretos e indiretos não são mais úteis.
- Inventário não deve ser considerado um ativo.
- Lucro é uma função do ganho, custo de material e custo total da operação.

Recentemente, discute-se as limitações da TA para lidar com decisões de longo prazo, como a possibilidade de interação do recurso com restrição de capacidade (RRC) com interação, o aparecimento de novos RRCs, não possuindo mecanismos para lidar com a variabilidade da capacidade do sistema (ROTA; DE SOUZA, 2021). De forma a adaptar a abordagem do TA para decisões de longo prazo, foi desenvolvido o conceito de Economia de Ganho ou *Throughput economics*, que visa tratar de ambientes com alta incerteza e decisões como decisões de mix de produto e gestão da capacidade de longo prazo (SCHRAGENHEIM; CAMP; SURACE, 2019).

Por fim, a TOC apresenta discussões próprias a respeito da implantação e uso de tecnologias. Goldratt et al. (2000) examinam o uso da tecnologia nas organizações no romance *Necessária, sim, mas não suficiente*. Nas discussões apresentadas, é destacada uma questão que precisa ser respondida quando uma nova tecnologia é considerada é: “Quando uma nova tecnologia traz valor?” (GOLDRATT; SCHRAGENHEIM; PTAK,



2000). A resposta de senso comum a que esses autores chegam é que se espera que uma nova tecnologia gere valor quando reduz uma limitação do sistema, ou seja, uma restrição (POTTER, 2010). Goldratt (2002) apresenta como abordagem para analisar se a adoção de uma nova tecnologia é benéfica por meio de seis questões tecnológicas: 1. “Qual é o poder da nova tecnologia?”; 2. “Qual limitação ou barreira atual a nova tecnologia reduz ou elimina?”; 3. “Que regras de uso, padrões e comportamentos existem hoje que consideram a limitação?”; 4. “Que regras, padrões e comportamentos precisam ser mudados para perceber os benefícios da nova tecnologia?”; 5. “Qual é a aplicação da nova tecnologia que permitirá a mudança acima sem causar resistência?”; e “Como a tecnologia pode ser usada para construir, capitalizar e sustentar o negócio?”. À medida que a visão da TOC sobre a adoção de tecnologias é um tema central para o presente trabalho, a seção 2.2.3. procura detalhar este tema.

### **2.2.2. Tambor-Pulmão-Corda e Gerenciamento do Pulmão**

Nessa seção, serão apresentados os aspectos fundamentais tanto da versão original do método Tambor-Pulmão-Corda (TPC) quanto sua versão moderna chamada de simplificada. Será destacado ainda como é feito o Gerenciamento do Pulmão (GP) nestes métodos, mecanismo imprescindível para o controle de produção segundo a TOC.

De forma estabelecer um construto denominado “Atividades do TPC/GP”, a ser adotado no instrumento de pesquisa da abordagem multicritério, fez-se necessário realizar um levantamento nas referências clássicas sobre o método. Como referências principais, foram utilizados os capítulos da seção III do Manual da Teoria das Restrições (COX; SCHLEIER, 2010), principalmente os capítulos de 7 a 10, e o dicionário da TOCICO, que apresenta verbetes destacados para todas as ferramentas do TPC/GP, suportando a redação das assertivas incluídas no construto. Também serviram de suporte os livros *Manufacturing at Warp Speed* (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2001) e *Supply chain Management at Warp Speed* (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009) e artigos clássicos sobre TPC (CHAKRAVORTY, 2001; SCHRAGENHEIM; RONEN, 1990, 1991) e TPC-S (BUESTÁN BENAVIDES; VAN LANDEGHEM, 2015; CHAKRAVORTY; HALES, 2016; LEE et al., 2010; SOUZA; BAPTISTA, 2010; WATSON; PATTI, 2008).

O Quadro 3 destaca as atividades que fizeram parte do construto “Atividades do TPC/GP”, base para o instrumento de pesquisa descrito na seção 4 e que estão revisadas após o Quadro 3.

Quadro 3 - Atividades do TPC/GP estudadas na presente pesquisa

Atividades	Referências básicas
Identificar o recurso com restrição de capacidade (RRC).	TPC (ATWATER; CHAKRAVORTY, 2002; C. GARDINER; H. BLACKSTONE JR; R. GARDINER, 1993; CHAKRAVORTY; ATWATER, 2006; SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000; SCHRAGENHEIM; RONEN, 1990; ZHAO; HOU, 2014) TPC-S (LEE et al., 2010; SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000; SOUZA; BAPTISTA, 2010)
Estabelecer o Tambor em situações de restrição de capacidade.	(C. GARDINER; H. BLACKSTONE JR; R. GARDINER, 1993; SCHRAGENHEIM; RONEN, 1990; WU; MORRIS; GORDON, 1994)
Estabelecer o Tambor em situações de restrição de mercado.	(ROTA; DE SOUZA, 2021; SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000; SOUZA; BAPTISTA, 2010)
Estabelecer pulmões estrategicamente posicionados para proteção dos planos de produção e entrega contra as incertezas.	(C. GARDINER; H. BLACKSTONE JR; R. GARDINER, 1993; CHAKRAVORTY; ATWATER, 2006; RADOVILSKY, 1998; RAHMAN, 1998; WOO; PARK; FUJIMURA, 2009; YE; HAN, 2008)
Ajustar dinamicamente o tamanho dos pulmões de tempo de acordo com seu consumo.	(PAN et al., 2006; SCHRAGENHEIM; RONEN, 1990; YE; HAN, 2008)
Ajustar dinamicamente o tamanho dos pulmões de matérias primas e componentes de acordo com seu consumo.	(C. GARDINER; H. BLACKSTONE JR; R. GARDINER, 1993; CHAKRAVORTY; ATWATER, 2006; RADOVILSKY, 1998; RAHMAN, 1998; WOO; PARK; FUJIMURA, 2009; YE; HAN, 2008)
Ajustar dinamicamente o tamanho dos pulmões de produtos acabados de acordo com seu consumo.	(C. GARDINER; H. BLACKSTONE JR; R. GARDINER, 1993; CHAKRAVORTY; ATWATER, 2006; RADOVILSKY, 1998; RAHMAN, 1998; WOO; PARK; FUJIMURA, 2009; YE; HAN, 2008)
Liberar material para a fábrica (Corda) de acordo com a restrição do sistema e com a necessária antecipação determinada pelo(s) pulmão(ões).	(SCHRAGENHEIM; RONEN, 1990; UMBLE; UMBLE; MURAKAMI, 2006)
Localizar e priorizar ordens de acordo com o	(CASTRO; GODINHO-FILHO; TAVARES-

consumo do pulmão.	NETO, 2020; LIU et al., 2011)”
Usar o gerenciamento do pulmão como fonte de informação para melhorias ao longo da cadeia de suprimentos.	(GARDINER; BLACKSTONE; GARDINER, 1993).
Monitorar a carga (nível de utilização) dos recursos.	(GUPTA, 2003; LAND et al., 2021)l
Gerenciar pulmões de capacidade.	(ROTA; DE SOUZA, 2021; SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000)
Permitir uso de lotes de transferência diferentes dos lotes de processamento.	(MILTENBURG, 1997; RUSSELL; FRY, 1997)
Permitir uso de lotes de processamento variáveis.	(KOO; BULFIN; KOH, 2007; RAHMAN, 1998)
Realizar o <i>full kitting</i> , checando a disponibilidade de todos os insumos antes da liberação de ordem de produção.	(APAOLAZA; LIZARRALDE; OYARBIDE-ZUBILLAGA, 2020; BAVEJA; KAPOOR; MELAMED, 2020; RONEN, 1992)
Determinar datas de entrega viáveis e apoiar decisões sobre a aceitação de novos pedidos.	(RIEZEBOS; KORTE; LAND, 2003; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009)

- **TPC e GP clássicos**

O TPC clássico pode ser entendido como uma conversão das ideias básicas do *software* OPT como um procedimento estruturado para gestão e programação de produção (BHARDWAJ; GUPTA; KANDA, 2010). Os termos tambor, pulmão e corda se remetem aos elementos principais da abordagem.

- **Identificação do recurso com restrição de capacidade (RRC) e monitoramento da carga (nível de utilização) dos recursos**

As etapas do TPC são análogas aos 5FS, iniciando, portanto, com a identificação da restrição (SCHRAGENHEIM; RONEN, 1990). Para uma organização, essa restrição pode ser desde recursos físicos, como máquinas e matéria-prima, até elementos intangíveis do sistema como políticas de gestão e o mercado (C. GARDINER; H. BLACKSTONE JR; R. GARDINER, 1993). Portanto, as restrições podem tanto ser internas quanto externas à empresa e as restrições externas podem ser geradas tanto por quem demanda quanto pelo fornecimento. Geralmente um sistema apresenta poucas restrições ao mesmo tempo (ZHAO; HOU, 2014). É importante destacar que cada caminho independente de fluxo no sistema terá uma única restrição.

Uma distinção importante deve ser feita entre os termos restrição, recurso com restrição de capacidade (RRC) e gargalo (*bottleneck* no inglês). Um RRC é o recurso com menor capacidade no sistema, limitando o ganho da organização (ATWATER; CHAKRAVORTY, 2002). Um gargalo pode ser entendido como qualquer recurso cuja carga de trabalho alocada ultrapasse a sua capacidade (CHAKRAVORTY; ATWATER, 2006). Se vários recursos forem gargalos, aquele com menor capacidade será o recurso com restrição de capacidade. Por sua vez, um RRC pode não ser um gargalo. O recurso com menor capacidade pode ter, em média, capacidade para processar sua carga atual e a restrição de fato pode estar no mercado (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000). O TPC está calcado na programação e acompanhamento do RRC.

- **Estabelecimento do Tambor em situações de restrição de capacidade**

O Tambor se refere à exploração da restrição do sistema que é o elemento que restringe o ritmo geral de produção (SCHRAGENHEIM; RONEN, 1990). A TOC recomenda que exista uma programação detalhada dos recursos que tenham restrição de capacidade (WU; MORRIS; GORDON, 1994).

Por exemplo, se a restrição estiver no mercado, o tambor será um cronograma detalhado de expedição (C. GARDINER; H. BLACKSTONE JR; R. GARDINER, 1993). O estabelecimento do pulmão é um mecanismo de exploração da restrição, pois se constrói um cronograma que privilegia as necessidades do recurso (SCHRAGENHEIM; RONEN, 1990).

- **Estabelecimento de pulmões estrategicamente posicionados para proteção dos planos de produção e entrega contra as incertezas**

O próximo passo é o estabelecimento de pulmões para proteger o plano feito na elaboração do tambor contra eventuais incertezas e interrupções decorrentes (C. GARDINER; H. BLACKSTONE JR; R. GARDINER, 1993). No TPC clássico, Pulmões são medidos em unidade de tempo, já que a ideia é que as peças produzidas cheguem na área protegida antes do momento em que serão processadas (YE; HAN, 2008).

Comumente, três pulmões são definidos na literatura sobre o TPC original de acordo com seu posicionamento no sistema (RADOVILSKY, 1998). O primeiro é o Pulmão de Restrição (PR) que protege o Tambor com a liberação antecipada das ordens

que passarão pelo RRC capacidade (CHAKRAVORTY; ATWATER, 2006). O segundo pulmão, chamado de Pulmão de Expedição (PE), é usado para garantir as datas de entrega (WOO; PARK; FUJIMURA, 2009). O PE é operacionalizado ao programar que o pedido chegue à expedição um intervalo de tempo antes da data de envio. Imediatamente a jusante da restrição é possível destinar um Pulmão de Espaço, que é literalmente um espaço vazio para armazenar o produto emergindo da restrição, assegurando que o RRC não tenha que parar por falta de espaço para armazenar seu trabalho. Por fim, há o Pulmão de Montagem (PM) que é adotado nas ocasiões em que peças que tenham passado pelo RRC tenham que ser montadas com peças vindas de um fluxo independente que não passe por essa restrição (RAHMAN, 1998). O PM não é um pulmão independente, sendo contabilizado como tempo adicional ao PE. O PM evita que estas peças vindas do RRC tenham que esperar outras peças, retardando todo o sistema.

A determinação do tamanho inicial dos pulmões é feita, geralmente, de forma empírica, por tentativa e erro (ZHAO; HOU, 2014). Por exemplo, uma alternativa seria tomar uma fração da soma dos *lead times* médios das tarefas que compõem o pulmão. Uma revisão sobre métodos de determinação de tamanho de pulmões pode ser encontrada em Ye e Han (2008).

- **Liberação de material para a fábrica (Corda) de acordo com a restrição do sistema e tamanho dos pulmões**

O último conceito que nomeia o método é a corda. A Corda é um mecanismo que força todas as partes do sistema a estarem subordinadas ao Tambor (SCHRAGENHEIM; RONEN, 1990). Isso é feito por meio da liberação de materiais no início do processo respeitando o cronograma estabelecido para o RRC. O cálculo da Corda para uma ordem executada no RRC seria a data prevista para ser executada no RRC menos o tamanho do PR. A mesma lógica ocorre para a expedição e operações de montagem. Isso assegura que material em excesso não seja liberado no sistema (UMBLE; UMBLE; MURAKAMI, 2006).

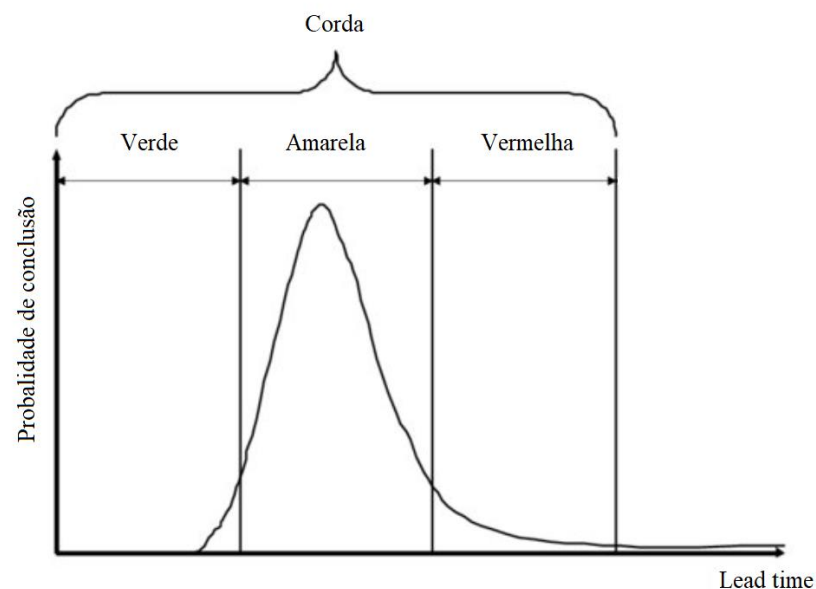
- **Localização e priorização de ordens de acordo com o consumo do pulmão**

Além do mecanismo de planejamento exposto, é feito o Gerenciamento do Pulmão como procedimento de acompanhamento do estado das ordens abertas, isto é, se

elas estão adiantadas, atrasadas ou respeitando o cronograma estabelecido (C. GARDINER; H. BLACKSTONE JR; R. GARDINER, 1993). Além disso, o procedimento que será explicado a seguir permite o ajuste do tamanho dos pulmões a fim que estes cumpram o papel de proteção da maneira mais econômica possível.

A ideia básica do GP é monitorar, com uma certa frequência, os estoques a frente dos recursos protegidos pelo pulmão e comparar a situação real com a planejada. O procedimento parte da divisão do pulmão em três regiões iguais (WOO; PARK; FUJIMURA, 2009). O *Status* do Pulmão (SP) seria a porcentagem do pulmão consumida por uma ordem de produção (LEE et al., 2010). Por exemplo, se o PR é de 12 horas e uma ordem está aberta há 9 horas, o SP seria 75%. Se uma ordem usou somente 33% do tempo do pulmão, ela estaria na região verde e não precisaria ser priorizada. Se uma ordem usar entre 33% e 66% do pulmão, ela está na região classificada como amarela. Há uma boa chance de a ordem estar chegando na restrição estando nesta região, o que pode ser visto na Figura 9. Quando a ordem ultrapassa o *status* de 66%, ela entra na região vermelha. Estas ordens devem ter prioridade total nas filas.

Figura 9 - Probabilidades de conclusão de ordens por região do *status* do pulmão



Fonte: Stratton e Knight (2010).

- **Ajuste dinâmico do tamanho dos pulmões de tempo de acordo com seu consumo**

Se as ordens estão chegando constantemente ao recurso ainda com SP na região verde, entende-se que o pulmão está superdimensionado e permite-se reduzi-lo (WANG et al., 2015). Por sua vez, se é comum observar ordens alcançando a região vermelha, é necessário ampliar o pulmão, já que não há proteção suficiente para garantir as entregas dentro do prazo.

Assim como o estabelecimento do tamanho inicial, estes ajustes dinâmicos também são regidos por regras empíricas (SCHRAGENHEIM; RONEN, 1990). Uma regra possível é estabelecer reduções de 1/3 do tamanho atual do pulmão quando 5% das ordens invadem a região verde e aumentos de 1/3 quando 10 % das ordens invadem a região vermelha. Como grande parte do *lead time* total é composto por tempo de espera em filas, é possível ser mais tolerante para ordens que invadem a região vermelha visto que elas ainda terão um terço do tempo do pulmão com prioridade total para serem finalizadas (PAN et al., 2006).

- **Uso do gerenciamento do pulmão como fonte de informação para melhoria contínua**

O gerenciamento de *buffer* fornece informações usadas para orientar a melhoria contínua do sistema de produção quando as causas subjacentes da necessidade de agilização das ordens na região vermelha são investigadas (C. GARDINER; H. BLACKSTONE JR; R. GARDINER, 1993). Antes de pensar em aumentar o tamanho do pulmão, deve-se considerar a possibilidade de eliminar as causas de atraso das ordens.

Focar o esforço de melhoria contínua em interrupções severas o suficiente para exigir o apressamento de ordens deve maximizar a taxa de melhoria no desempenho. Conforme o desempenho da produção melhora, os *buffers* se tornam menores, fazendo com que o WIP e o tempo de espera sejam reduzidos ainda mais.

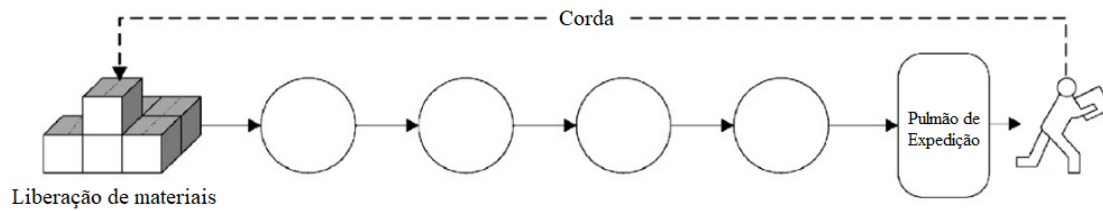
- **Realizar o *full kitting*, checando a disponibilidade de todos os insumos antes da liberação de ordem de produção**

Um conceito importante aplicado no TPC e em outras áreas de aplicação da TOC como a CCPM é o de kit completo (*full kit* ou *complete kit* no inglês). Kits completos são as preparações que são necessárias ou recomendadas para serem realizadas antes de executar um conjunto de tarefas (LESHNO; RONEN, 2001). A ideia é evitar as consequências negativas de se iniciar uma tarefa sem todos os itens

necessários para completá-la, como documentos, ferramentas, desenhos e os próprios componentes (APAOLAZA; LIZARRALDE; OYARBIDE-ZUBILLAGA, 2020). Algumas dessas consequências são o aumento do WIP, aumento do *lead time* médio e de sua variância e queda nos índices de qualidade (RONEN, 1992).

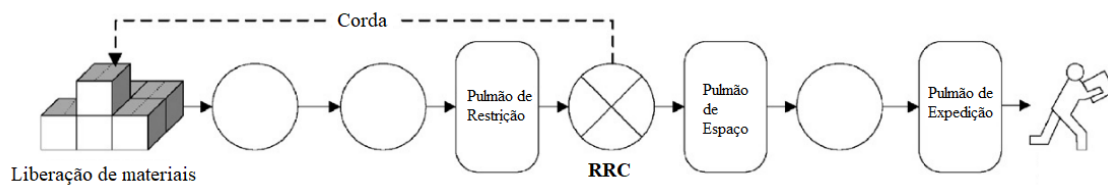
A figuras 10, 11 e 12 resumem os conceitos fundamentais do TPC clássico que serão detalhados em seguida.

Figura 10 - TPC clássico para sistema com restrição de mercado



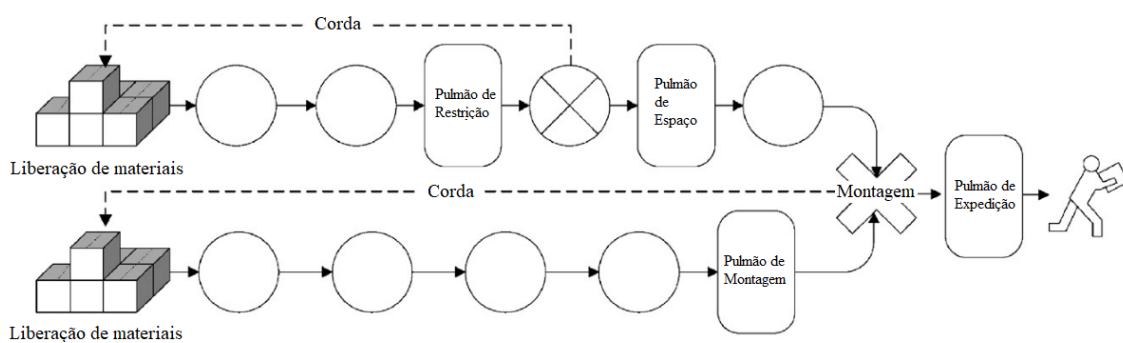
Fonte: Watson, Blackstone e Gardiner (2007).

Figura 11 - TPC clássico para sistema com restrição de capacidade



Fonte: Watson, Blackstone e Gardiner (2007).

Figura 12 - TPC clássico para sistema com restrição de capacidade



Fonte: Watson, Blackstone e Gardiner (2007).

- **TPC-S para ambientes MTO (*make-to-order*) e MTA (*make-to-availability*)**



Schrageheim and Dettmer (2000) propuseram um método adaptado do TPC chamado de Tambor-Pulmão-Corda Simplificado (TPC-S) como forma de superar algumas barreiras impostas ao TPC clássico. Primeiramente, identificar a restrição pode ser difícil e mudanças em sua localização causam transtornos para o gerenciamento. Além disso, mudanças nos próprios pedidos também exigem adequação do tambor.

Um avanço buscado pela versão simplificada é adequar o método para diferentes tipos de ambiente produtivo. Por exemplo, o uso de pulmões de tempo não atende bem ambientes que produzam para estoque (MTO).

- **Identificação da restrição de mercado**

Como tratado anteriormente, a restrição do sistema não precisa necessariamente ser o RRC. Justamente o que distingue o TPC-S de sua versão original é sua premissa de que a demanda de mercado é a principal restrição do sistema, mesmo quando uma restrição de capacidade interna surge temporariamente (LEE et al., 2010). O raciocínio por trás dessa suposição é que, se os requisitos do mercado não forem totalmente satisfeitos, a demanda de mercado futura diminuirá (SOUZA; BAPTISTA, 2010). Quando o mercado é claramente a restrição, a combinação da simplicidade do planejamento e o controle altamente focado proporcionado pelo gerenciamento do pulmão resulta na total subordinação das operações às vendas (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000).

- **Estabelecimento do Tambor em situações de restrição de mercado**

O tambor deve ser adequado para atender à restrição de mercado sendo baseado agora em pedidos firmes para ambientes MTO (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000). Conforme as ordens são recebidas, a capacidade do RRC deve ser monitorada (SOUZA; BAPTISTA, 2010). Espera-se que o RRC tenha capacidade excedente, já que o mercado é a restrição. Nos momentos em que o RRC estiver muito carregado, medidas de curto-prazo são tomadas para reduzir a carga como, por exemplo, horas extras no curto prazo ou aumentos de preço no médio prazo (ROTA; DE SOUZA, 2021).

- **Gerenciamento de pulmões de capacidade**

Ao conjunto de medidas para alavancar a capacidade temporariamente por um determinado custo dá-se o nome de Pulmão de Capacidade (*Capacity buffer*) (SCHRAGENHEIM, 2010b). Este pulmão visa assegurar flexibilidade do chão de fábrica e a capacidade protetiva do sistema, isto é, aquela que protege o sistema de rupturas (ROTA; SOUZA, 2021). Evita-se grandes investimentos em uma expansão definitiva da capacidade, obtendo os benefícios descritos (SCHRAGENHEIM, 2010b).

- **Descrição geral do MTO (pulmão de pedido, carga planejada) e MTA (estoque alvo, liberação de ordens, *Downstream* WIP)**

Com relação aos pulmões, somente é mantido o pulmão que protege a expedição, ou seja, aquele que busca garantir o atendimento à demanda (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). Este pulmão é chamado aqui de Pulmão de Produção (PP) ou de Mercado. Por ter menor capacidade, trabalho será naturalmente acumulado em certos momentos no RRC garantindo um fluxo mais contínuo. Há um PP para cada ordem emitida. Assim como no TPC clássico, a determinação do PP inicial não precisa ser exata, pois valores aproximados tem alta probabilidade de prevenir situações caóticas derivadas tanto da liberação antecipada quanto da liberação em atraso.

O GP ocorre analogamente ao TPC clássico com a vantagem de se acompanhar somente um tipo de pulmão. Além das três cores representando a porcentagem de consumo do pulmão, é possível usar preto para simbolizar ordens que tenham ultrapassado o tempo destinado pelo pulmão (STRATTON; KNIGHT, 2010).

O acúmulo de carga no RRC resultante de todos os pedidos firmes dentro de um horizonte de tempo é chamado de Carga Planejada (CP) (CHAKRAVORTY; HALES, 2016). A CP representa o tempo esperado para se concluir esses pedidos. A CP permite um acompanhamento da capacidade da operação. Quando comparada com as horas disponíveis deste horizonte de tempo, a CP indica a possibilidade do surgimento de restrições internas (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000).

Diferentemente do TPC clássico, a Corda não está subordinada ao RRC (LEE et al., 2010). Dessa forma, a liberação do material é feita de acordo com os pedidos recebidos em um ambiente MTO.

- **Determinar datas de entrega viáveis e apoiar decisões sobre a aceitação de novos pedidos (MTO)**

A integração entre o TPC-S e as vendas permite a exploração da restrição de mercado por meio do acompanhamento da CP (NANFANG; KAIJUN; TIAN, 2008). Listando todas os pedidos firmes e suas estimativas de tempo para conclusão, determina-se uma data viável para se prometer novas entregas (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000). Tomando-se a metade do PP como uma boa estimativa de conclusão da ordem, podemos considerar como data para liberação do material para início da produção como a data de entrega viável menos metade do PP (SCHRAGENHEIM, 2010b). A data viável mais próxima após a adição desta ordem será meio pulmão a frente da data viável anterior.

Este prazo estabelecido para entrega pode ser consideravelmente menor do que aquele considerado o *benchmarking* no setor (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000). À vista disso, este tempo adicional entre a data o fim do PP e o prazo padrão do setor, chamado de capacidade protetiva, cria oportunidades para aceitar pedidos urgentes, além de ter margem de capacidade para atender pedidos mais prioritários (KIM; COX; MABIN, 2010). A soma do PP com a capacidade protetiva é chamada de Pulmão de Pedido (LEE et al., 2010). Este pulmão é gerenciado da mesma forma que o PP, utilizando o esquema de cores para priorização com a diferença de que a capacidade protetiva permite um consumo mais lento. Para a TOC, ter capacidade protetiva no RRC é uma exigência para a exploração da restrição de mercado (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009).

O ambiente de produção para estoque (*make-to-stock* - MTS) tem particularidades que devem ser adaptadas no TPC-S. O desafio para a gestão do RRC neste tipo de ambiente é que sua capacidade poderá ser usada para gerar estoques de produtos desnecessários (SOUZA; PIRES, 2014). A base da solução neste caso é manter os estoques baixos, acelerando a reposição (CASTRO; GODINHO-FILHO; TAVARES-NETO, 2020). Esse conceito evita os prejuízos de uma confiança exacerbada em previsões.

A TOC propõe um subgrupo do ambiente MTS aderente a sua proposta chamado de MTA (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). O MTA seria um ambiente onde se promete aos clientes em potencial de que sempre que precisarem dos itens específicos, eles os encontrarão no depósito específico (SCHRAGENHEIM, 2010b). Desta forma, espera-se que a oferta estável permita elevar a demanda, possivelmente oferecendo por um preço mais alto.

O primeiro passo do TPC-S para ambientes MTA é a definição do Nível Alvo (NA). O NA é a quantidade de estoque que será reabastecido (CASTRO; GODINHO FILHO; TAVARES NETO, 2020). Este estoque deve atender a demanda média mais um estoque de segurança. Portanto, o NA é análogo ao PE por seu objetivo de proteger a expedição de falta de produtos com a diferença de que o NA é um pulmão de estoque ao invés de tempo. A definição do NA inicial segue a mesma lógica dos demais pulmões, não precisando ser exato, pois será ajustado naturalmente no processo de gerenciamento do pulmão.

A geração de ordens ocorre pela comparação dos estoques totais com o nível alvo (SOUZA; PIRES, 2014). Os estoques totais compreendem os estoques de produtos acabados, mas também as ordens abertas. Em uma verificação diária, se os estoques totais forem menores que o nível alvo, abre-se uma ordem de produção, preferivelmente com a quantidade suficiente para repor a diferença. Para evitar a abertura de ordens muito pequenas que sobrecarreguem os recursos com setups, há dois mecanismos (SCHRAGENHEIN; DETTMER; PATTERSON, 2009). O primeiro é o estabelecimento de lotes mínimos de produção, o que pode gerar estoques acima do nível alvo em alguns momentos. O outro mecanismo se baseia na carga no RRC das ordens abertas que ainda não foram processadas por este recurso (SOUZA; PIRES, 2014). A liberação de novas ordens deve ocorrer somente quando esta carga cai abaixo de uma certa porcentagem (sugere-se 80%) do tempo médio de reposição. Assim, diariamente, somente seriam liberadas ordens até este limite, priorizando aquelas cujo tamanho seja maior proporcionalmente ao NA.

- **Ajuste dinâmico do tamanho dos pulmões de matérias primas, componentes e produtos acabados de acordo com seu consumo**

Para ambientes MTA, o Gerenciamento do Pulmão é feito pela comparação do NA com o estoque atual dos produtos acabados (TAKAMI NARITA; IKEZIRI; BERNARDI DE SOUZA, 2021). A quantidade de consumo do NA, ou seja, a quantidade de produtos que estão como atualmente como WIP, é chamado de penetração do pulmão (*buffer penetration* – BP) (CASTRO; GODINHO FILHO; TAVARES NETO, 2020). A razão entre o BP e o NA indica o *status* do pulmão. Seguindo o mesmo mecanismo de divisão em três regiões do pulmão, se o *status* é superior à 66,7%, classifica-se o *status* na região vermelha e prioriza-se as ordens que

alimentarão esse estoque. *Status* abaixo de 33,3% são classificados como verde e *status* em níveis intermediários são interpretados como amarelos.

A abordagem para o MTA também exige ajustes dinâmicos no tamanho dos pulmões quando a penetração nestes é excessivamente baixa ou alta (NARITA; IKEZIRI; SOUZA, 2021). Possíveis diretrizes para o ajuste são se a acumulação de penetração durante o tempo de reposição é maior ou igual à zona vermelha, aumente o nível alvo (sugere-se 33%) e quando o estoque fica na região verde em todo o tempo de reposição, reduz-se o nível alvo em até 33%.

- **Uso de lotes de transferência diferentes dos lotes de processamento**

Um último tópico importante tanto para o TPC original quanto para a versão simplificada é a diferenciação dos lotes de transferência dos de processamento. O lote de processamento é aquele que efetivamente será produzido completamente em um determinado recurso (RUSSELL; FRY, 1997). Um lote de transferência é a quantidade de unidades que se movem de um centro de trabalho para o próximo (YE, 2009). Uma premissa da abordagem da TOC, assim como na abordagem *lean*, é que os tamanhos dos dois tipos de lotes não devem coincidir. Um lote de transferência inferior a um lote de processo permite produzir paralelamente em muitos recursos e encaminhar o lote mais rapidamente para o próximo recurso, acelerando o fluxo (HILMOLA, 2004). Os dois tipos de lote coincidirão onde a operação de fabricação é realizada em todo o lote do processo (MILTENBURG, 1997).

- **Uso de lotes de processamento variáveis**

O tamanho do lote do processamento deve ser específico para cada operação e deve ser variável conforme necessário ao longo do tempo (RAHMAN, 1998). Operações com *setups* rápidos podem atender lotes menores por exemplo (KOO; BULFIN; KOH, 2007). Contrariamente, em centros de trabalho com gargalo, especialmente aqueles com tempos de preparação significativos, pequenos lotes de transferência devem ser usados com lotes de processamento relativamente grandes e econômicos.

### **2.2.3. Adoção de tecnologias na perspectiva da TOC**

De forma a aprofundar as discussões sobre a temática do trabalho, é apresentada uma análise da literatura em TOC e TPC sobre a implantação de tecnologias no contexto da manufatura. Uma parte das discussões é decorrente de busca nas bases *Scopus* e *Web of Science*, em abril de 2021. A busca foi realizada utilizando a expressão booleana: ("*drum-buffer-rope*" OR "*bottleneck management*" OR "*constraint management*") AND *technology*. A amostra resultante de 36 artigos se limitou a publicações de periódicos e em inglês. A partir da leitura integral destes artigos foram selecionadas reflexões relevantes que compõem a discussão a seguir. Essa seção também foi complementada com outros textos, como o *TOC Handbook* e livros como *Necessária, sim, mas não suficiente* e *a Síndrome do Palheiro*.

Destaca-se que a origem da TOC está intrinsecamente ligada à tecnologia, já que Goldratt apresentou suas regras de programação da produção na forma de *software*, com o OPT, no final dos anos 1970 (GOLDRATT, 1988). Ao longo dos anos, a ideia de gestão de restrições foi integrada aos sistemas de controle da produção existentes, como MRP e JIT (BETZ JR, 1996) e, mais tarde, com uso de *Internet* (CHUA; SHEN; BOK, 2003).

O aparecimento de uma nova tecnologia acompanha a expectativa de uma melhoria significativa do desempenho organizacional. Por exemplo, nos anos 80, o MRP II (*Manufacturing Resource Planning* ou planejamento de recursos de fabricação) foi desenvolvido para proporcionar maior integração aos sistemas de gerenciamento, incorporando a análise financeira e as funções contábeis. Já na década de 1990, com a tecnologia da *Internet* desenvolvida, o ERP aparece como evolução, trazendo os recursos de uma empresa sob o controle de um sistema integrado e centralizado. As empresas continuaram a investir em tecnologia, buscando uma solução milagrosa de planejamento integrado e, no entanto, resultados significativos não foram alcançados. Em meados da década de 1990, os sistemas avançados de planejamento e programação (APS) melhoraram a visibilidade gerencial da capacidade dos recursos da empresa no ERP, visando maximizar o nível de utilização. Os resultados pretendidos não foram alcançados (SMITH; PTAK, 2010).

Coman e Ronen (1995) aplicaram os princípios da TOC na então nascente gestão da TI em operações, tendo como base uma aplicação dos cinco passos de focalização para avaliar a adoção de tecnologia de automação de escritório realizada anos antes (FLOYD; RONEN, 1989). Como destacado na introdução, Coman e Ronen propuseram três tipos de interações entre a TOC e TI, que podem ser estendidas para

qualquer tipo de tecnologia. Em seu artigo o foco estava no tipo *IT-aiming*, que está entre os mais estudados posteriormente, com estudos usando os princípios da TOC para avaliar e implantar tecnologia de maneira focalizada (BALAJI; VENKUMAR; SABITHA, 2018; BOUTELLIER; LOFFLER, 2006; GROOP; REIJONSAARI; LILLRANK, 2010; KIMBROUGH et al., 2015). Ainda, propõem o conceito de *computer-aided TOC (CAT)*, e afirmam que TI poderia ser aplicada para o monitoramento das taxas de utilização de recursos, programação computadorizada de recursos de acordo com a técnica DBR, priorização de decisões de compra de acordo com a técnica de custo/utilização. As tecnologias mais recentes também poderiam fazer esse papel de suporte, sem alterar as premissas e heurísticas propostas no TPC.

Porém, Floyd e Ronen (1989) afirmam em suas conclusões que uma das principais causas do fracasso da automação de escritório é que o foco de atenção foi mal direcionado para componentes do sistema cuja melhoria pouco importa para o desempenho geral do sistema. O foco deveria estar nas restrições do sistema. A tecnologia é um instrumento subordinado à organização, sendo um pré-requisito analisar primeiro a organização, em termo de metas, medidas de desempenho e localização das restrições. O papel da tecnologia é explorar essa restrição, ajudar a subordinar recursos não restritivos ou elevar a restrição (COMAN; RONEN, 1995).

Na mesma linha, Goldratt apresentou sua visão sobre a adoção de tecnologias, principalmente a nascente TI, em publicações como “*The Power of Technology*” (GOLDRATT, 2006) e “Necessária, sim, mas não suficiente” (GOLDRATT; SCHRAGENHEIM; PTAK, 2000). No livro de 2000, Goldratt e colegas fazem uso de declarações simples para distinguir entre os conceitos de necessidade e suficiência relevantes para a implementação de *softwares*. Essas declarações são alcançadas por perguntas simples que devem ser respondidas para ajudar a alcançar o sucesso da implementação da nova tecnologia. Para Goldratt, o poder de tecnologias computacionais está em sua capacidade de armazenar, transferir e recuperar dados. Porém, deve-se analisar qual limitação ela pretende sanar. Espera-se que uma nova tecnologia agregue valor quando eliminar uma restrição existente. Nesse sentido, uma restrição é algo que impede o sistema de alcançar melhor o objetivo declarado. Portanto, se uma nova tecnologia não remove ou diminui uma restrição, ela não pode trazer benefícios. Daí a ideia de que a tecnologia é um recurso necessário para avançar as organizações, mas não é suficiente, visto que deve ser voltada à gestão correta da

restrição e envolve mudanças comportamentais para se firmar (GOLDRATT; SCHRAGENHEIM; PTAK, 2000; PRETORIUS, 2007).

Goldratt, na parte 1 da sua série de apresentações em vídeo “*Necessary and Sufficient*” (GOLDRATT, 2002), discute o exemplo dos sistemas ERP e seu potencial de gerar benefícios. Um sistema ERP fornece dados oriundos de diferentes áreas funcionais, permitindo a visualização do sistema de forma global e a tomada de decisões holísticas, proporcionando, potencialmente, uma melhoria significativa nos resultados. Porém, mesmo com mais dados disponíveis, grande parte empresas continuaram tomando decisões com base em otimizações locais, com conseqüente pequeno impacto no desempenho geral da organização. Dessa forma, sem alterar as regras que acomodavam a limitação (no caso o uso das informações relevantes na tomada de decisão), essas empresas não tiveram os resultados esperados pela adoção dos novos sistemas integrados de gestão. Isso ilustra um ponto importante para a TOC: enquanto as regras que ajudaram a acomodar uma limitação anterior (quando não havia determinada nova tecnologia) continuarem sendo obedecidas, novas tecnologias proporcionarão poucos ganhos significativos no resultado, pois ele estará limitado pelas regras organizacionais anteriormente estabelecidas. Tais regras são chamadas de restrições políticas para a TOC.

O mesmo fenômeno que ocorreu na implantação dos sistemas ERP pode se dar no caso das tecnologias da Indústria 4.0, e em um grau ainda maior, dado o volume e velocidade de transferência de dados ainda mais expressivos. Novas tecnologias fornecem mais precisão e confiabilidade nos dados. Esses dados, agora mais precisos e acessados em tempo real são processados em informações, o que no longo prazo levará à criação de conhecimento. No entanto, para gerar conhecimento é necessário um contexto, que é, na maioria das vezes, definido pelo ambiente no qual os dados e informações são criados. Assim, o ambiente fornece o contexto no qual novos dados, informações e conhecimento serão criados e visualizados. Especialmente nos ambientes de negócios, definem-se regras para visualização e avaliação dos dados. Estas normas são frequentemente baseadas em experiências próprias de quem as prescreve, ou seja, o que os foi ensinado, o que a maioria faz ou pensa, ou mesmo seus hábitos. Muito raramente, a legitimidade dessas regras é questionada, à medida que persiste a tomada de decisões usando dados, informações e conhecimento criados em torno desses princípios ou dessa cultura organizacional (PRETORIUS, 2007).



Na visão de Eli Schragenheim ([s.d.]), ao oferecer informações focadas para um público bem definido, empresas como *Facebook*, *Google* e *LinkedIn* fazem bom uso das novas tecnologias. Ter os meios para abordar segmentos de mercado muito específicos pode ser usado para obter conhecimento sobre as preferências de seus clientes. Porém, existem varejistas, por exemplo, que têm contato direto e frequente com seus clientes, mas não conseguem fazer bom uso das informações que acumulam. Assim, ele aponta que a análise da adoção de qualquer tecnologia deve envolver a análise de seus benefícios potenciais e se realmente algum obstáculo atual é superado com a nova tecnologia.

Para a TOC, os problemas na implantação de uma nova tecnologia têm relação com a forma como a mudança é gerenciada. A verdadeira mudança para melhorar significativamente o desempenho organizacional vai além de apenas identificar a necessidade da mudança ou seguir tendências que funcionaram para outras empresas. Trata-se de mudar hábitos. Muitas vezes esses hábitos são repetidos sem a devida reflexão sobre sua real necessidade. Até que os novos hábitos sejam introduzidos na organização e os antigos tenham desaparecido, os tomadores de decisões têm de pesar alternativas e considerar diversas abordagens, o que exige muito esforço. Como a abordagem antiga continua sendo uma opção mais fácil, retroceder é usual. Assim, o processo de mudança não se completa (NEWBOLD, 2010).

Como dito anteriormente, a TOC busca compreender e, se necessário, alterar os princípios e regras básicos que geram hábitos nos sistemas organizacionais. Nesse contexto, algumas características de interesse desses sistemas incluem: os sistemas estão em busca de objetivos, a medição do desempenho do sistema é derivada desse objetivo, e as medidas influenciam o comportamento humano. Ademais, todos os componentes do sistema devem suportar o objetivo, existindo propriedades emergentes no nível do sistema que não existem no nível de qualquer componente. Portanto, melhorias significativas (alavancagem) somente ocorrem quando os componentes do sistema trabalham juntos e otimizar um subsistema muitas vezes não otimiza o sistema. Importante ressaltar que o sistema possui uma capacidade limitada que deve ser levada em consideração (POTTER, 2010).

A análise e transformação de dados em informação, que eventualmente serão a base para tomadas de decisões gerenciais, são frequentemente baseadas em regras erradas, que levam a decisões sem foco no objetivo do sistema, desconsiderando os princípios que realmente governam as organizações. A disponibilidade abundante, a

precisão e a velocidade dos dados (e as tecnologias que os fornecem) aceleram esse processo, levando-nos às respostas erradas mais rapidamente (POTTER, 2010). Observa-se, portanto, que para a TOC, aplicar uma tecnologia em um sistema, sem mudar os princípios que regem esse sistema, pode levar a resultados piores, apesar de a tecnologia possuir benefícios potenciais evidentes.

Diferentes restrições exigem tecnologias diferentes para melhoria do desempenho do sistema (FLOYD; RONEN, 1989). Por exemplo, se a restrição for a comunicação, deve-se aplicar tecnologias voltadas a transmissão e visualização de informações. Já se a restrição estiver na tomada de decisão do gerente, recomendam-se sistemas de suporte à decisão, que hoje aparecem na forma de sistemas de BI (*business intelligence*), com uso de *big data*, *data analytics*, inteligência artificial e simulação (STRANDHAGEN et al., 2017). Se a restrição são materiais, espaciais ou de tempo de transporte, tecnologias de rastreamento e localização se tornam relevantes (WANG et al., 2016b). O uso de programação por TPC integrada a tecnologias de revisão e liberação de ordens já foi testada em ambientes de produção contínua (GUAN et al., 2008).

No contexto da Indústria 4.0, suas ferramentas tentam lidar com a abundância de informações (DE CAMARGO FIORINI et al., 2018; LI; DAI; CUI, 2020), a fim de tomar decisões informadas, mesmo em um ambiente de alta incerteza (DE MIRANDA et al., 2020; KAIVO-OJA; LAURAEUS, 2018). Por outro lado, a estrutura de técnicas e métodos da TOC compartilha suposições comuns, com ênfase aqui em como ele lida com as incertezas. A TOC considera muito seriamente a presença de incerteza, pelo uso de pulmões visuais (SCHRAGENHEIM, 2006). A título de exemplo, para a TOC, certas soluções não são extraídas diretamente de dados concretos. Elas não são armazenadas em nenhum banco de dados computadorizado ou estão absolutamente corretas. O desenvolvimento dessas soluções deve seguir uma estrutura de causa e efeito, baseada também na intuição (GUPTA; BOYD; KUZMITS, 2011). Essa relação de causa e efeito é difícil de visualizar em um ambiente de alta incerteza.

Para a TOC, uma organização é um sistema regido por seus próprios princípios. É necessário garantir que as decisões sejam baseadas em padrões apropriados e que a validade e a qualidade das decisões sejam verificadas regularmente, pois os ambientes estão em constante estado de mudança. Boas regras organizacionais atuais podem se tornar restrições organizacionais no futuro, afetando a forma como elas exploram suas novas tecnologias. Se isso acontecer, as atividades ficarão fora de controle. Daí a

dificuldade de tirar o melhor proveito das novas tecnologias (PRETORIUS, 2007). Segundo Goldratt, muito antes de qualquer tecnologia ser introduzida em um contexto empresarial, a organização já contava com modos de comportamento, medidas, políticas e regras para lidar com os fatores limitantes de seu desempenho (GOLDRATT, 2006). A mudança do padrão tecnológico, ainda que seja difícil por si só, é uma pequena parte. Mudar regras, que levam a comportamentos e cultura, é o que define se a tecnologia apresentará impacto efetivo.

O grande impulso atual para uso de *big data*, algoritmos avançados de previsão e outras tecnologias derivadas da Indústria 4.0 expressa a esperança de que o *software* reduza a ameaça da incerteza e promova um desempenho organizacional ideal. Para Goldratt, tecnologia da informação falha em não ver o quadro geral, se preocupando com otimizações locais, o que só agrava quando em um ambiente com maior disponibilidade de dados departamentais (GOLDRATT, 1990). A TI produz dois benefícios óbvios para a organização: manutenção do banco de dados e cálculos rápidos. Pode-se adicionar o gerenciamento das comunicações como um terceiro elemento. Para a TOC, a lógica por trás dos cálculos deve ser clara e aceita pelos usuários, o que indica que a simplicidade deve imperar sobre a sofisticação. A simplicidade agrega valor por meio de melhores decisões e ações mais eficazes. A TOC desafia a suposição de que a única maneira de melhorar uma organização é por meio do desempenho ideal de todos os recursos, o que é exatamente o que tecnologias sofisticadas tentam buscar em ambientes complexos e incertos.

Várias metodologias de planejamento importantes apareceram nos últimos anos, mas apresentam falhas de desempenho mesmo apresentando grande sofisticação. Muitos pacotes de *software* APS foram lançados e descontinuados em pouco tempo. Uma possível explicação para essas dificuldades de desempenho é que essas metodologias são vulneráveis à incerteza comum e esperada. Planejamentos excessivamente detalhados tendem a exacerbar o impacto da incerteza nos planos. Dessa forma, a TOC procura planejar holisticamente, com base em objetivos bem definidos, protegendo o que é realmente importante com o uso de pulmões (SCHRAGENHEIM, 2015a).

Goldratt chamou um *software* que desenvolveu no final dos anos 80 de “*Disaster*” (Desastre), para enfatizar o que aconteceria ao usuário que executa o *software* sem entender a lógica, as políticas por trás da tecnologia (SCHRAGENHEIM, 2016). Neste sentido, se algum dia houver implementações de ERP, BI, IA, *machine learning* ou *data analytics* baseadas na TOC, elas deverão seguir a lógica da

abordagem, que é não otimizante por natureza. Além disso, haverá a necessidade de combinar dados baseados na intuição do usuário com uma análise numérica rigorosa.

Existe uma discussão sobre até que ponto técnicas de otimização e de análise avançada de dados seriam úteis para aplicação junto às técnicas da TOC e até mesmo se seriam coerentes com seus princípios. A TOC recorre à elaboração de soluções robustas, que visam bons resultados na maioria das vezes, evitando explicitamente otimizações dentro do nível natural de ruído do sistema (WALSH, 2010). A abordagem de TOC leva em conta que, como a incerteza é inerente ao processo, o sistema deve estar preparado para reagir à presença da variabilidade. Por exemplo, a TOC recomenda a mentalidade do “Papa-léguas” (famoso personagem conhecido por sua grande velocidade e parada súbita). Quando o sistema realmente precisa ser acionado, é feito o mais rápido e cedo possível. Em conjunto com pulmões de tempo e a manutenção de excessos de capacidade dos recursos, tais mecanismos amortecem os efeitos das variabilidades.

No livro *Throughput economics*, Eli Schragenheim e colegas exploram o papel da intuição nos processos decisórios. Para os autores, o uso de análises avançadas é limitado, dada a impossibilidade de se ter acesso a todos os dados necessários para se tomar decisões de forma eficaz e rápida. Existe espaço para se investigar se as tecnologias digitais derivadas da Indústria 4.0 alterariam o papel da intuição nas tomadas de decisão (SCHRAGENHEIM; CAMP; SURACE, 2019). A intuição pode estar errada, principalmente em ambientes de mudanças rápidas. Porém, os dados coletados também podem ser falsos, devido a erros ou manipulação intencional, ou falhas nos algoritmos de processamento. Essa incerteza é comum nas tomadas de decisão diárias (SCHRAGENHEIM, 1992, 2020a).

Ainda tratando de técnicas avançadas para tomada de decisão, como inteligência artificial e aprendizagem de máquina, por exemplo, é importante destacar que a TOC não visa a otimização, mas sim soluções robustas, suficientemente boas. Esse processo heurístico é natural para o ser humano, principalmente quando tomando decisões rápidas e sob alta incerteza (SCHRAGENHEIM, 2018a). É o Sistema 1 de processamento cerebral, proposto por Daniel Kahnemann, sendo rápido, paralelo, automático e inconsciente, guiado por emoções e associações, em contraposição ao Sistema 2, baseado em regras e cálculos conscientes, embora lento (KAHNEMAN, 2012).

As organizações parecem cada vez mais impor o valor da otimização nas decisões, e por isso, quase forçam os gerentes a olhar além de satisfazer o estritamente

necessário, levados a serem consideravelmente menos focados, o que leva a atrasos e erros no processo decisório (BARNARD; SCHRAGENHEIM, 2016). A busca de soluções ótimas força os gerentes a realizar análises quantitativas, baseadas logicamente. No entanto, quando informações relevantes estão faltando, as decisões se tornam arbitrárias. Os gerentes acabam ignorando grande parte da incerteza, pois as probabilidades não estão claras para serem usadas (SCHRAGENHEIM, 2020a). Neste sentido, o uso irrestrito de tecnologias de análise de dados avançada, como *big data* e *machine learning*, pode levar a piores decisões, o que merece um estudo mais detalhado.

Para Schragenheim (1992), em departamentos em que a incerteza está muito presente, como em vendas, não se espera que se façam previsões com precisão absoluta, então o processo deve ser orientado a tomar melhores decisões, não ótimas. Nesse sentido, informações parciais podem ser suficientes. Ainda assim, a administração deve estar ciente da quantidade de incerteza e tentar prever uma faixa razoável de valores para vários cenários futuros. De forma a encontrar essa faixa, deve-se fazer previsões otimistas e pessimistas. Observe que não é óbvio que a previsão otimista agregaria mais lucro do que a pessimista. Ambos os cenários geram mudanças nas medidas de ganho e despesa operacional e, se os dois apontarem para um ganho líquido positivo, a ideia é implantada.

Destaca-se que o uso de tecnologia para previsões não é ignorado pela comunidade de TOC. Muitas vezes, o processo de suporte à tomada de decisão não pode ser gerenciado manualmente devido aos extensos dados e cálculos envolvidos. Assim, pacotes de *software* dedicado, como o DSTOC (*Decision support in the TOC way* ou Suporte à decisão no modo TOC), foi desenvolvido pela *Vector Consulting Group India* em conjunto com Eli Schragenheim. O *software* era usado para cálculos em grande escala, com base em uma grande quantidade de dados relativos a produtos, vendas, requisitos de capacidade e disponibilidade de recursos críticos. O objetivo da tecnologia deve ser apoiar as decisões de alto nível, permitindo que a intuição das pessoas chave seja traduzida em números, para que todas as ramificações possam ser visualizadas. As decisões são tomadas por humanos, apoiados por sua intuição e conhecimento e pelos cálculos em massa que os computadores atuais podem fazer facilmente (SCHRAGENHEIM, 2006).

Para a TOC, assim como para o *Lean*, decisões envolvendo previsões em cadeias de suprimento, como quanto estocar de cada produto em cada local, enfrentam maior

nível de incerteza e, portanto, devem ser baseadas em horizontes curtos e reabastecimento rápido e, por isso, respondem melhor às flutuações na demanda. A principal suposição é que a demanda pelo próximo período, tomando o curto prazo, é semelhante ao último período. Assim, realizar um reabastecimento rápido, de acordo com a demanda real, fornece ajuste rápido às flutuações aleatórias. O planejamento de longo prazo precisa considerar tendências, sazonalidade e outras alterações significativas potenciais. Isso requer previsões que olhem mais para o futuro e podem capturar a probabilidade de tais alterações e incluí-las em uma faixa razoável de valores (SCHRAGENHEIM, 2021). Além disso, o horizonte de previsão deve refletir um tempo confiável de suprimento e não além desse valor, de forma a manter a incerteza comum e esperada em níveis controlados. O GP é a ferramenta indicada para lidar com este tipo de incerteza, monitorando as flutuações naturais do processo enquanto identifica situações incomuns (SCHRAGENHEIM, 2020b).

Os conceitos básicos aplicados pela TOC para lidar com a incerteza comum são os pulmões, o gerenciamento dos pulmões, a capacidade protetiva e um planejamento enxuto e focado. O uso de pulmões reconhece a presença de incerteza e torna a proteção contra incertezas explícita e gerenciável. Já o gerenciamento dos pulmões é possível porque seu consumo é parcial e controlado, sendo uma ferramenta única da TOC. Dadas as incertezas internas e externas, a falta de capacidade protetiva pode prejudicar o desempenho de entrega. Por fim, o TPC usa um planejamento muito restrito, deixando muitas decisões para o último minuto, onde o impacto real da incerteza já é conhecido (SCHRAGENHEIM, 2015b).

Para Schragenheim, a contabilidade de ganhos tem sido aplicada em tomadas de decisão de curtíssimo prazo, onde o impacto da incerteza pode ser relativamente pequeno. Para decisões maiores, que podem impactar a organização nos médio e longo prazos, a intuição apoiaria as ferramentas da contabilidade de ganhos. A própria intuição humana é limitada, mas o conhecimento e intuição de bons gestores é um ativo a ser explorado ao tomar decisões que não tenham informações concretas suficientes. Para previsão de produtos conhecidos, mas com alta incerteza, a recomendação é avaliar o impacto total no ganho de vários geradores de ganho, enquanto acompanha atentamente a carga sobre recursos críticos. Neste caso, valores médios podem ser utilizados, visto que a agregação diminui a variabilidade. Para novas oportunidades, são poucos os geradores de ganho considerados e a possibilidade de agregação diminui (SCHRAGENHEIM, 2006; SCHRAGENHEIM; CAMP; SURACE, 2019). O

*framework* mostrado na Figura 13 procura integrar os princípios da abordagem de TOC, os atributos da tomada de decisão sob incerteza e as principais características do ambiente organizacional da Indústria 4.0.

Figura 13 - *Framework* de integração dos princípios da TOC, tomada de decisão sob incerteza e o ambiente da Indústria 4.0



Fonte: Elaborada pelo autor.

Conclui-se que a análise e transformação de dados em informação, que eventualmente se traduz em conhecimento e sabedoria, é frequentemente baseada em regras erradas, regras que levam a decisões sem foco no objetivo do sistema. Regras inadequadas podem levar à subutilização de tecnologias e decisões ineficazes. A abundância, precisão e a velocidade dos dados (e as tecnologias que os fornecem) podem acelerar esse processo, levando até mesmo a respostas erradas mais rapidamente.

Segundo o Nobel de Economia Herbert Simon, “a riqueza da informação significa uma escassez de outra coisa: uma escassez de tudo o que essa informação consome. O que a informação consome é bastante óbvio: consome a atenção de seus destinatários. Portanto, uma riqueza de informações cria uma pobreza de atenção e uma necessidade de alocar essa atenção eficientemente entre a superabundância de fontes de informação que a consomem”. O Prof. Simon era um visionário, por discutir em 1971 uma realidade que se impõe na gestão de operações hoje, durante o desenvolvimento da Indústria 4.0. Para Simon, a capacidade de processamento de informações e a atenção

gerencial configuram gargalos à atividade organizacional, e o gargalo se torna mais estreito à medida que se move para o topo da hierarquia gerencial (SIMON, 1973).

Goldratt tinha visões semelhantes. Inclusive é atribuída a ele a frase “a atenção gerencial é a restrição final das organizações”. Discussões mais aprofundadas dessa visão podem ser encontradas em Goldratt (2009). No livro “A Síndrome do Palheiro” (GOLDRATT, 1990), ele alertou sobre a importância de se diferenciar dados e informações e a necessidade de sistemas de informação verdadeiros, que ofereçam apenas as informações relevantes para os gerentes tomarem decisões importantes. Mais tarde, ele também compartilhou sua visão de que a restrição final de qualquer organização era a gestão, especialmente a atenção limitada da alta gerência. Goldratt avançou o trabalho iniciado por Simon, delineando mecanismos práticos para ajudar os gerentes a decidirem no que se concentrar (e, mais importante, no que não se focar), para explorar melhor e não desperdiçar o recurso mais escasso em qualquer organização - a atenção limitada da administração (BARNARD; SCHRAGENHEIM, 2016). Neste sentido, as ferramentas da TOC parecem adaptadas à realidade imposta pela quarta revolução industrial, com abundância de informações e necessidade de foco.

Além disso, as tecnologias da informação derivadas de *big data*, por exemplo, podem impactar os princípios e ferramentas do TOC. Em uma situação com pouco acesso a dados e grandes incertezas, a tendência é que o gerenciamento perca o foco e prefira extrair o máximo de tudo o que ele tem disponível (ótimos locais). Ou, dadas as muitas incertezas e imprecisões dos dados, as restrições ou "elos fracos" não são facilmente identificados. Como resultado, aparentemente, o melhor a se fazer para se garantir rentabilidade e competitividade é buscar a máxima eficiência em todos os lugares.

#### 2.2.3.1. As seis questões tecnológicas da TOC

Um benefício de *softwares* computacionais é que eles são modelados de acordo com políticas específicas. O livro “Necessária, sim, mas não suficiente” examina o ambiente dos sistemas ERP e a necessidade de se definir claramente como o usuário obterá valor real a partir do sistema. A análise da tecnologia pelas seis questões tecnológicas vem no sentido de evidenciar o valor da implantação (GOLDRATT; SCHRAGENHEIM; PTAK, 2000).



De acordo com o Dicionário da TOCICO, as seis questões tecnológicas são um conjunto de seis perguntas usadas para avaliar o potencial e o impacto de uma nova tecnologia. As ideias resultantes das respostas às seis questões podem fornecer foco ao desenvolvimento das características do produto e da abordagem de *Marketing*, e ajudar os desenvolvedores da nova tecnologia a compreender melhor a correspondência necessária entre a nova tecnologia e a maneira como o usuário deve usá-la (COX et al., 2012). As seis questões sobre tecnologia são apresentadas a seguir.

1. Qual é o poder da nova tecnologia?
2. Qual limitação ou barreira atual a nova tecnologia reduz ou elimina?
3. Que regras de uso, padrões e comportamentos existem hoje que consideram a limitação?
4. Que regras, padrões e comportamentos precisam ser mudados para perceber os benefícios da nova tecnologia?
5. Qual é a aplicação da nova tecnologia que permitirá a mudança acima sem causar resistência?
6. Como a tecnologia pode ser usada para construir, capitalizar e sustentar o negócio?

De forma a exemplificar o uso desse método, apresentam-se respostas às seis questões feitas para a adoção de leitor de *e-books*, de acordo com Cox et al. (2012):

1. O poder da tecnologia seria a capacidade de armazenar e exibir livros em formato eletrônico em uma tela que é semelhante ao formato da página de um livro, juntamente com navegação completa e a capacidade de baixar livros adicionais;
2. Duas limitações diferentes superadas pelos atuais leitores de livros seriam a grande necessidade de espaço para livros em casa e a dificuldade de se carregar uma ampla variedade de livros ao viajar ou em outro local;
3. As soluções atuais para as limitações são livros em formato de bolso que facilitam transportar ou armazenar vários livros. As limitações gerais forçam um processo de escolha de livros com base em recomendações e os leitores sentem-se compelidos a terminar a leitura mesmo quando o livro não é particularmente interessante;

4. As novas regras são comprar e armazenar muitos livros no leitor e carregá-lo consigo em qualquer lugar. Em alguns casos, pode-se baixar um ou alguns capítulos para ler antes de comprar o livro eletrônico;
5. O leitor de livros em si deve ser muito leve, difícil de quebrar e ocupar pouco espaço. O preço dos livros deve ser baixo o suficiente para possibilitar a criação de uma biblioteca completa. A leitura deve ser possível mesmo com forte incidência da luz solar;
6. O grande problema seria levar as pessoas a superar a resistência à leitura em uma tela. Tornar o próprio leitor de livros mais acessível, possibilitando, assim, que mais pessoas o experimentem, é uma medida possível para contornar esse problema. Também, gerenciar um inventário de livros em formato eletrônico em rápido crescimento é imprescindível.

A seguir, cada uma das seis questões é apresentada e discutida com maior detalhamento.

#### 1. Qual é o poder da nova tecnologia?

Sobre a primeira questão, Goldratt acreditava que, por exemplo, o poder da tecnologia de sistemas computacionais está na capacidade de lidar com dados. Estes sistemas seriam amplamente superiores em armazenar, transferir e recuperar dados, se comparados com a tecnologia empregada anteriormente, o papel. Ele afirma que, apesar do potencial de tecnologias avançadas ser impressionante, muitos gerentes não são “loucos por tecnologia”, mas estariam interessados em apenas uma coisa: em benefícios, no impacto que essa tecnologia exerce no desempenho de sua empresa. Na sua visão, benefícios são conquistados apenas quando uma limitação é diminuída (GOLDRATT, 2006). Daí decorre naturalmente a segunda pergunta.

#### 2. Qual limitação ou barreira atual a nova tecnologia reduz ou elimina?

Se a tecnologia pode trazer benefícios se, e somente se, diminuir uma limitação, é necessário explorar os significados dos termos benefício e limitação. Uma limitação é qualquer coisa que impeça que um sistema alcance um desempenho mais alto em direção à sua meta. Já o benefício é alcançado quando uma mudança causa uma melhor realização da meta do sistema. Se a tecnologia não diminui qualquer limitação, ela não pode criar benefícios. Se algo é uma limitação, por definição, significa que a diminuir traz benefícios. Assim, de forma a alcançar os benefícios da nova tecnologia, a

implantação deve acompanhar uma melhor compreensão da meta do sistema. No entanto, para melhorar o desempenho em relação a essa meta, uma limitação deve ser reduzida. Se a nova tecnologia não diminuir uma limitação, ela não trará nenhum benefício. E, se não traz benefícios, então ela não é necessária. O conceito de necessidade, no contexto da implantação de novas tecnologias, pode ser definido como uma atividade, mudança ou tecnologia que gera benefícios ao reduzir uma limitação (WALT, 2007).

Ademais, Schragenheim (2017) afirma que a nova tecnologia pode inclusive gerar limitações ao invés de eliminá-las. Assim, ele propõe que a segunda questão, da maneira como enunciada por Goldratt, seja complementada pela questão “Quais novas limitações são impostas pela nova tecnologia”? Algumas das novas limitações podem ser eliminadas no futuro. Outras atualmente parecem impossíveis de solucionar, o que reduz o valor da tecnologia. Portanto, é essencial identificar novas limitações que venham a surgir.

Segundo Goldratt (2002), muitas empresas alegam não estarem entusiasmadas com a implantação de novos sistemas de informação, que prometiam grandes benefícios. Uma vez que seriam esperadas melhorias significativas no resultado com a implantação da nova tecnologia, o problema seria outro, não se relacionando com a tecnologia em si. Muito antes de a tecnologia aparecer, as empresas já possuem modos de comportamento, medidas, políticas e regras que ajudam a acomodar a limitação. Assim, enquanto as regras que mantêm a limitação forem obedecidas, o resultado permanecerá o mesmo. Em outras palavras, não se pode observar nenhum benefício significativo. Portanto, identificar a limitação que a tecnologia reduz não é suficiente. Para Walt (2007), um processo de melhoria é suficiente quando todas as atividades ou aspectos dentro dos limites do sistema que trazem benefício pela diminuição de uma limitação foram explorados. Portanto, um processo de melhoria é suficiente quando as regras atuais que limitam o sistema foram exploradas. Daí decorre a importância de se identificar as regras que limitam o sistema, processo estimulado pela terceira questão.

3. Que regras de uso, padrões e comportamentos existem hoje que consideram a limitação?

Já que o alcance dos benefícios da tecnologia envolve a mudança das regras que sustentam a limitação, a forma como é tratada a restrição existente deve ser examinada (POTTER, 2010). Goldratt et al. (2000) sugere que os costumes, hábitos, medidas,

políticas e procedimentos permitem o reconhecimento da restrição. Isso não significa que a existência da restrição seja totalmente compreendida. A introdução de novas tecnologias altera o comportamento e as medidas de desempenho dos afetados pela nova tecnologia. Às vezes, não é fácil ver as regras e políticas que estão em vigor de forma a contornar uma restrição existente. Também as próprias medições do desempenho podem ser a causa para determinado comportamento.

Apesar de fundamental, a terceira questão não é feita frequentemente. Identificar uma limitação provê conhecimentos importantes sobre o valor potencial de eliminá-la, mas o que fornece evidências sobre o valor que de fato é agregado é a comparação entre a nova situação com a situação anterior à nova tecnologia. Considera-se, ao responder tal questão, o fato de que as pessoas encontram maneiras de lidar com a limitação, reduzindo seu impacto negativo (SCHRAGENHEIM, 2017). O problema é quem nem sempre as atuais regras, padrões e comportamentos são eficazes em lidar com essas limitações, abrindo espaço para uma quarta questão.

4. Que regras, padrões e comportamentos precisam ser mudados para perceber os benefícios da nova tecnologia?

Grande parte dos comportamentos dos tomadores de decisão está relacionada à forma como o desempenho é medido. Goldratt resumiu isso de maneira excelente quando afirmou: “Diga-me como você me mede e eu lhe direi como me comportarei. Se você me mede de maneira ilógica... não se queixe de meu comportamento ilógico” (GOLDRATT; COX, 1990, p. 26). Assim, é evidente que, se as funcionalidades da nova tecnologia forem inseridas, mas as medidas e o comportamento que impedem de se elevar a restrição não são alterados, os benefícios a serem obtidos pela nova tecnologia serão muito limitados ou inexistentes. Segue-se então que as medidas e o comportamento realmente se tornam a nova restrição.

Portanto, a introdução de novas tecnologias deve centrar-se na área em que terá maior impacto, que como visto, é a restrição. Implantar uma nova tecnologia apenas pelo fato de ser nova, muitas vezes apenas melhora a eficiência, mas não apresenta impacto para o resultado. Além disso, ter os dados precisos em tempo hábil não garante a tomada correta da decisão (POTTER, 2010).

Chega-se à conclusão de que a implantação de uma nova tecnologia é uma condição necessária para promover a melhoria de desempenho de uma organização, mas não é suficiente por si só. "Para termos os benefícios quando instalamos a nova

tecnologia também precisamos mudar as regras que reconhecem a existência da limitação" (GOLDRATT; SCHRAGENHEIM; PTAK, 2000, p. 137). As regras devem ser consideradas, em princípio, para proporcionar benefícios. De forma a sustentar os resultados da implantação, um importante ponto inicial é repensar a estratégia a partir da nova tecnologia, identificando o valor único para os clientes que precisam desse valor e não o obtêm em nenhum outro lugar.

A maioria das regras desenvolvidas para contornar uma limitação é baseada na lógica de "ótimos locais". Dessa forma, destaca-se que a identificação das regras antigas ainda não é suficiente para determinar uma nova regra, que a suplante e garanta o aparecimento dos benefícios da tecnologia. Muitas vezes, as pessoas que projetaram e implantaram a tecnologia não estavam cientes de que algumas das regras que observam na realidade são um resultado da limitação que sua tecnologia está prestes a diminuir. Por isso, projetam a tecnologia de acordo com as regras antigas e, consolidando-as e suprimindo a possibilidade de sua tecnologia trazer benefícios reais. Os benefícios do sistema são vendidos com expressões vagas como alcançar melhor visibilidade dos processos (GOLDRATT, 2006).

Com as perguntas três e quatro, Goldratt se concentra na atividade de mudar as regras que reconhecem e acomodam a existência da limitação quando uma nova tecnologia é implementada. No livro *Necessária, sim, mas não suficiente*, e na série em vídeo derivada do livro, disponível em CD-ROM, Goldratt (2002b) estabelece a mudança das regras como necessária para se obter mais benefícios da implementação de uma nova tecnologia. Essa atividade pode consistir em uma pequena mudança nas regras ou até mesmo uma substituição das regras antigas por novas. A suficiência da implantação da nova tecnologia só pode ser justificada se todas as necessidades associadas à implementação da nova tecnologia tiverem sido identificadas e utilizadas. O benefício total só pode ser realizado quando o esforço de melhoria é suficiente. O objetivo final da implementação de novas tecnologias (um esforço de melhoria) deve ser o de alcançar o benefício total (WALT, 2007).

5. Qual é a aplicação da nova tecnologia que permitirá a mudança acima sem causar resistência?

Para que a tecnologia promova um grande salto no desempenho organizacional, deve-se responder à quinta pergunta (Quais são as mudanças na tecnologia são necessárias, à luz das novas regras?). Segundo Walt (2007), os *insights* obtidos ao

responder as primeiras quatro perguntas podem ser usados para fornecer recomendações ao provedor da tecnologia sobre quais recursos podem ser necessários e quais recursos são redundantes e podem ser desprezados.

6. Como a tecnologia pode ser usada para construir, capitalizar e sustentar o negócio?

O importante ponto de partida para responder a sexta e última pergunta é identificar valor único, bem definido, para os clientes que precisam desse valor e não o conseguem em nenhum outro lugar. As questões anteriores delinham a contribuição geral da nova tecnologia, apontando assim para vários segmentos de mercado e quais são os principais desafios. O próximo passo é realizar esforços concentrados para definir o valor mais específico oferecido para um mercado-alvo bem definido (SCHRAGENHEIM, 2017). É o que a TOC chama de vantagem competitiva decisiva (GUPTA; BHARDWAJ; KANDA, 2011). Uma vez que uma ideia de vantagem competitiva decisiva é levantada, uma análise baseada nas seis questões, mas reduzida às especificidades da necessidade do mercado-alvo e à maneira proposta de lidar com ela, revelaria a nova oportunidade de negócio (SCHRAGENHEIM, 2017).

Outro ponto importante concernente à sexta questão é que causar a mudança requer a apresentação de um novo modelo de negócio ganha-ganha. A última pergunta é feita para garantir que não haja conflitos inerentes entre o implementador, o provedor de serviços e, principalmente, o cliente. Assim, eles estão todos alinhados para atingir o mesmo objetivo e são medidos de acordo (WALT, 2007). Mudar de uma tecnologia antiga para uma nova não é simples e, como visto, existem desafios maiores a serem enfrentados antes da mudança se dar de fato. Para obter benefícios, deve-se, ao mesmo tempo, mudar as regras. Regras essas que estão apoiadas em modos de comportamento, na própria cultura da empresa. Essa é provavelmente a razão da relutância da maioria das empresas fornecedoras de tecnologia de ofertar sistemas baseados nas novas regras. Elas não se consideram qualificadas para mudar a forma como as organizações clientes são gerenciadas.

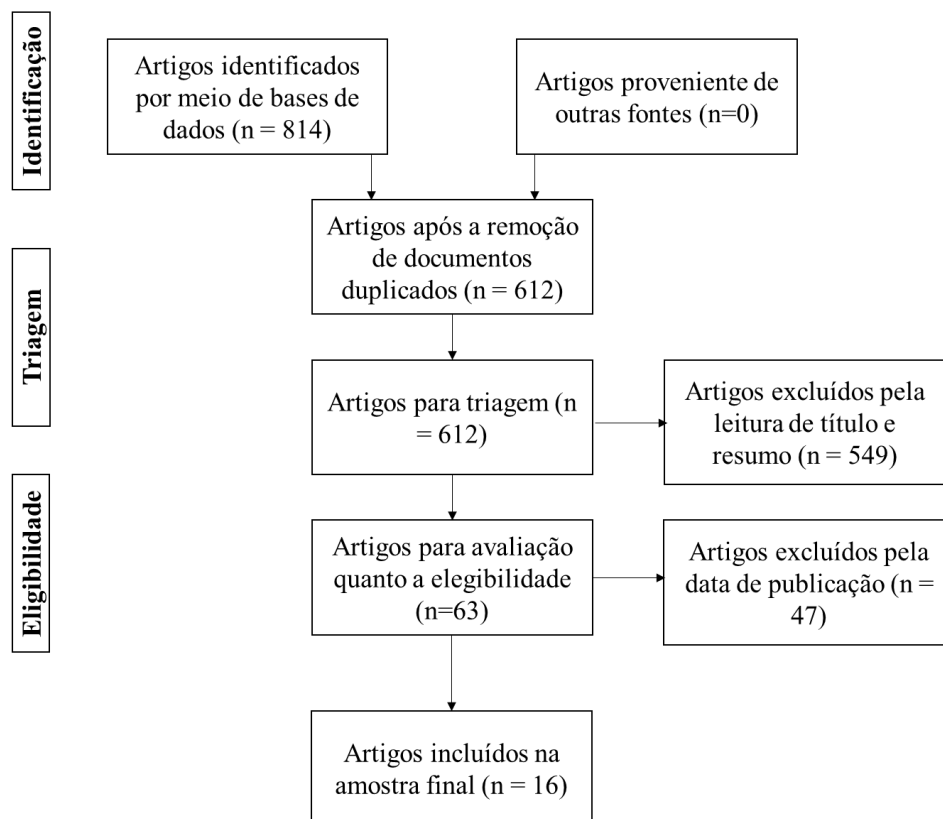
### **3. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA EM INDÚSTRIA 4.0 E TOC**

De forma a mapear a pesquisa em Indústria 4.0, identificando um conjunto de trabalhos a serem utilizados como referência para justificar e basear as discussões da presente pesquisa, foi elaborada uma revisão sistemática nos temas TOC e Indústria 4.0. As seções seguintes mostram o método utilizado (3.1.) e os principais resultados (3.2.) e discussões (3.3.).

#### **3.1. MÉTODO DE PESQUISA PARA A REVISÃO SISTEMÁTICA**

De forma a possibilitar que a revisão sistemática fosse feita de forma objetiva e rigorosa, optou-se por seguir as etapas previstas no método PRISMA (MOHER et al., 2009), que consiste em uma *checklist* de 27 itens e um diagrama de fluxo de quatro fases (ver Figura 14). De Moher et al. (2009), a lista de verificação do PRISMA fornece diretrizes para realizar uma revisão sistemática da literatura (por exemplo, título, resumo, método, resultados, discussão) e o fluxograma PRISMA descreve o fluxo de informações através das diferentes fases da revisão sistemática da literatura (ou seja, identificação, triagem, elegibilidade, inclusão).

Figura 14 - Framework PRISMA



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Moher et al. (2009).

A primeira etapa consistiu na amostragem, ou seja, na busca, identificação e filtragem de publicações que apresentam elementos temáticos de TOC e Indústria 4.0 simultaneamente. Com relação aos termos de busca utilizados, primeiramente, foram construídos dois conjuntos iniciais de palavras-chave, extraídas de revisões da literatura previamente publicadas em *journal* sobre Indústria 4.0 e TOC. Posteriormente, algumas dos termos foram excluídos por serem redundantes ou retornarem resultados genéricos, fora do escopo do trabalho, como siglas e termos que possuem correlatos em áreas como Química e Computação.

As bases de dados *Scopus* e *Web of Science* foram utilizadas para a realização da coleta e a amostra refere-se a buscas realizadas até janeiro de 2020. As expressões de busca aplicadas nas bases são apresentadas na Quadro 4, com as palavras-chave referentes a TOC e Indústria 4.0, respectivamente. Dentro de cada tema principal, os termos foram conectados pelo booleano OR e para buscar as combinações entre os temas, o conectivo AND foi aplicado entre os dois conjuntos de termos. As aspas indicam a pesquisa por expressões exatas e os asteriscos permitem que a pesquisa inclu



palavras derivadas de um prefixo. A pesquisa na *Web of Science* usou os mesmos termos de pesquisa e operadores booleanos, adaptados à sua sintaxe específica. Ressalta-se que um filtro inicial foi aplicado às bases de dados, incluindo apenas publicações em inglês, e tendo um periódico como fonte.

Quadro 4 - Termos de pesquisa aplicados na coleta

Research themes	Search strings
Theory of Constraints	"buffer management", "buffering method", "capacity constrain*", ccpm, "conflict resolution diagram", "constraint buffer", "core conflict", "cost world", "critical chain", "current reality tree", dbr, "drum buffer rope", "evaporating cloud", "finite capacity scheduling", "finite scheduling", "five focusing steps", "future reality tree", Goldratt, "inherent potential", "inherent simplicity", "make to availability", "never say I know", "optimized production technology", "optimized production timetable", "optimised production technology", "people are good", poogi, "prerequisite tree", "process of ongoing improvement", "protective capacity", "pull replenishment", "strategy & tactics", "Theory of Constraints", "Theory of Constraint", "Theory of Restrictions", "Theory-of-Constraints", "Thinking Process", "throughput accounting", "throughput orientation", "throughput world", toc, "transition tree".
Industry 4.0	"3D printing", "4° industrial revolution", "4th industrial revolution", "additive fabrication", "additive manufacturing", "advanced analytics", "artificial intelligence", "augmented reality", automation, "autonomous car", "autonomous guided", "autonomous vehicle", "big data ", "cloud computing", "cloud manufacturing", "connected industry", cpps, "cyber physical production system", "cyber physical system", "cyber-physical system", "data mining", "digital intelligence", "digital manufacturing", "digital technolog*", digitalization, digitalization, digitization, digitization, "driverless car", "driverless vehicle", "embedded system", "factory of the future", "factory-of-things", "flexible manufacturing system", "fourth industrial revolution", "human-computer interaction", "human-machine interaction", iiot, "industrial internet", "Industrie 4.0", "Industry 4.0", "integrated industry", "intelligent factories", "intelligent factory", "intelligent manufacturing", "intelligent product", "internet of services", "Internet of Things", "internet plus", iot, "machine learning", "machine-to-machine communication", "manufacturing data", "manufacturing execution system", "mixed

	reality", "mobile computing", "mobile technology", modularization, modularization, "production 4.0", "radio-frequency identification", "rapid manufacturing", "rapid prototyping", "real-time factory", "real-time manufacturing", rfid, robot*, "robot car", "robotic car", robotics, scada, "self-driving car", "self-driving vehicle", "smart factories", "smart factory", "smart industry", "smart manufacturing", "smart product", "smart production", "smarter manufacturing", "social media", "social network", "Supervisory Control and Data Acquisition", "supervisory system", "ubiquitous factories", "ubiquitous factory", "ubiquitous manufacturing", "virtual reality", virtualization.
--	---

Fonte: Elaborado pelo autor.

A busca inicial resultou em 238 arquivos na *Web of Science* e 576 artigos na *Scopus*. Foi utilizado o pacote *bibliometrix* do *software* estatístico R (ARIA; CUCCURULLO, 2017), para compilar e retirar redundâncias nas amostras. 202 duplicatas foram encontradas e removidas, resultando em uma amostra de 612 documentos. Em seguida, passou-se para leitura de título e resumo, para exclusão de artigos que não se enquadrassem no tema específico da revisão. Como motivos de exclusão, podem-se citar:

- Artigos mencionam “*Thinking Process*” fora do contexto de TOC.
- Artigos não tratam especificamente de indústria 4.0 e suas tecnologias.
- Siglas TOC, DBR e CCPM usadas em outros contextos.
- Menciona “*inherent potential*” ou “*inherent simplicity*” com outras conotações, fora do contexto de TOC.
- Mencionam *capacity constraint*, *protective capacity*, *buffer management* ou *buffering method*, mas artigo não é sobre TOC.
- Menções a “*people are good/better*” sem se remeter a princípios da TOC.
- Menciona “*finite capacity scheduling*” ou “*finite scheduling*”, mas artigo não discute a TOC.
- “*Theory of Constraints*” se referindo à teoria de Dirac.
- Cita *Strategic & Tactics*, mas não se refere aos processos de raciocínio.
- Usa os termos *throughput* ou *throughput accounting*, mas sem relação com TOC.
- Cita “*optimized production technology*” fora do contexto de TOC.

- Sem acesso ao *abstract*.
- “*Theory of Constraints*” como teoria da área de projeto de estradas.
- “*Theory of Constraints*” como teoria da área de fisioterapia e ciência do movimento.
- “*State transition tree*” é um termo usado em engenharia de automação.
- Sem indicação de autoria.
- Sem acesso ao texto integral.

A partir destes filtros, chegou-se a uma amostra de 63 artigos para leitura integral. Ainda nesta etapa, muitos artigos foram retirados, a maioria por serem textos que tratam de tecnologias da informação e computacionais anteriores à Indústria 4.0. O próprio termo Indústria 4.0 foi introduzido apenas em 2011 (KAGERMANN, 2015). Preferiu-se por se desconsiderar todas as publicações dos anos 90 e anos 2000 por essa razão. Após leitura integral, chegou-se a 16 artigos com contribuições específicas, que poderiam passar por análise de conteúdo.

Seguiu-se a análise qualitativa da amostra, por meio de *frameworks* teóricos de pesquisa. Para identificar os conceitos e tecnologias explorados pelos trabalhos, foram utilizados os *frameworks* de Oesterreich e Teuteberg (2016), Osterrieder et al. (2020) e Horváth and Szabó (2019). Já para avaliar quais áreas da TOC foram exploradas pelas publicações, optou-se por se utilizar a classificação adotada por Blackstone (2001) e Ikeziri et al. (2018).

### **3.2. RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA**

A revisão identificou 16 artigos aderentes aos critérios de inclusão e exclusão descritos na seção anterior e que apresentam contribuições que possam explicar as relações entre TOC e Indústria 4.0. Esta seção pretende apresentar um *overview* do conjunto de artigos, bem como analisar quais conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 já foram explorados pela literatura em TOC e em que áreas da TOC os estudos se voltaram.

A Quadro 5 apresenta os 16 artigos identificados, com uma breve descrição de suas contribuições.

Quadro 5 - Amostra de artigos analisados na revisão sistemática

Título	Autores	Fonte	Ano	Contribuição
Applying the Theory of Constraints to health technology assessment	Groop, Johan Reijonsaari, Karita Lillrank, Paul	International Journal on Advances in Life Sciences	2010	Uso de abordagem derivada da TOC para avaliar tecnologias móveis aplicadas à saúde
Integrating lean and other strategies for mass customization manufacturing: a case study	Stump, Brandon Badurdeen, Fazleena	Journal of Intelligent Manufacturing	2012	Avalia como TOC pode ser integrado ao <i>lean</i> para ambientes de produção com customização em massa.
On the strategy of supply chain collaboration based on dynamic inventory target level management: A theory of constraint perspective	Tsou, Chi-Ming	Applied Mathematical Modelling	2013	Explora estratégias de colaboração em <i>supply chain</i> baseadas na TOC a partir de técnicas de mineração de dados.
Throughput accounting and performance of a manufacturing company under stochastic demand and scrap rates	Hilmola, Olli Pekka Gupta, Mahesh	Expert Systems with Applications	2015	Propõem um modelo de simulação baseado em dinâmica de sistemas para problemas de mix de produtos sob demanda estocástica e taxas de refugo, empregando, dentre os cenários avaliados, a abordagem Tambor-Pulmão-Corda e a Contabilidade de Ganhos.
A practical multiple-tool-set approach for increasing agile response in overhaul production with limited resource requirement visibility	Chou, Han-Hsin Wang, Chi-Tai Sheu, Ru-Shuo	International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice	2016	Integração de identificação por radiofrequência (RFID), simulação, métodos de identificação de gargalos (TOC) para aumentar resposta ágil em condições de baixa visibilidade da necessidade de recursos.
Real-time scheduling based on optimized topology and communication traffic in distributed real-time computation platform of storm	Li, Chunlin Zhang, Jing Luo, Youlong	Journal of Network and Computer Applications	2017	Um algoritmo baseado em TOC é proposto para programação em tempo real em plataforma de computação em nuvem.
A schedule of cleaning processes for a single-armed cluster tool	Noh, Seung Min Kim, Ja Hee Jang, Seong	International Journal of Industrial Engineering: Theory Applications	2017	TOC é utilizada para programação da frequência de autolimpeza de ferramenta robótica.

	Yong	and Practice		
Applying Theory of Constraints-based approach to solve memory allocation of cloud storage	Chang, Kuei-Hu Chang, Yung-Chia Chang, Yi-Shiun	International Journal of Systems Science: Operations & Logistics	2017	Este artigo propõe uma abordagem baseada na TOC para resolver a alocação de memória de armazenamento em nuvem, que usa informações de mercado para realizar previsão contínua.
Green Production Planning and Control for the Textile Industry by Using Mathematical Programming and Industry 4.0 Techniques	Tsai, Wen-Hsien	Energies	2018	Uma abordagem integrada de modelos matemáticos baseados em TOC e sistemas de sensoriamento e detecção em tempo real é aplicada para aumentar o desempenho ambiental da produção.
A Framework of Production Planning and Control with Carbon Tax under Industry 4.0	Tsai, Wen-Hsien Lu, Yin-Hwa	Sustainability	2018	Um modelo de programação matemática integrando o <i>activity based costing</i> (ABC) e TOC é construído em ambientes de produção com uso de taxas de carbono, com uso de <i>big data</i> , RFID e MES para controle do chão de fábrica.
Green Production Planning and Control Model with ABC under Industry 4.0 for the Paper Industry	Tsai, Wen-Hsien Lai, Shang-Yu	Sustainability	2018	Um modelo baseado em TOC e ABC é aplicada na indústria de papel e celulose, integrado a tecnologias de manufatura verdes, visando redução de desperdícios. Aspectos de sistemas ciberfísicos e IoT são discutidos para controle da produção e da qualidade.
Exploratory Analysis of Modularization Strategy Based on the Theory of Constraints Thinking Process	Eidelwein, Fabricio Piran, Fabio Antonio Sartori Lacerda, Daniel Pacheco Dresch, Aline Rodrigues, Luis Henrique	Global Journal of Flexible Systems Management	2018	Os autores analisam a adoção de estratégias de modularização por parte das empresas, empregando os processos de raciocínio da TOC.
Smart Manufacturing through TOC based Efficiency Monitoring System (TBEMS)	Balaji, V. Venkumar, P. Sabitha, M. S.	International Journal of Engineering & Technology	2018	Este artigo trata de implementação do conceito de TOC combinado com <i>Internet das Coisas</i> (IoT), visando aumentar a velocidade de implementação da tecnologia.

Drum buffer rope-based heuristic for multi-level rolling horizon planning in mixed model production	Saif, Ullah Guan, Zailin Wang, Chuangjian He, Cong Yue, Lei Mirza, Jahanzaib	International Journal of Production Research	2019	A pesquisa investiga o problema de planejamento multinível na produção de modelos mistos usando o mecanismo do TPC e um algoritmo heurístico baseado no TPC é desenvolvido, sendo útil para a implementação de IoT e Indústria 4.0.
Analysis of production activity control mechanisms for Industry 4.0	Costa, Daniela Martins, Mariana Martins, Susana Teixeira, Eduarda Bastos, Andreia Cunha, Ana Rita	International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics	2019	Analisa o desempenho de diversos métodos de controle da produção, entre eles o TPC, utilizando de simulações no contexto da Indústria 4.0.
From Batch & Queue to Industry 4.0-Type Manufacturing Systems: A Taxonomy of Alternative Production Models	Rüttimann, Bruno G. Stöckli, Martin T.	Journal of Service Science and Management	2020	Analisa a transição de sistemas de manufatura tradicionais para os da Indústria 4.0, incluindo a descrição de uma célula de fabricação JIT com base na abordagem TPC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise dos artigos da amostra foi feita seguindo *frameworks* teóricos de publicações de relevância nas áreas de estudo. Para a análise segundo a Indústria 4.0, foram utilizados o *framework* de tecnologias e conceitos chave da Indústria 4.0, proposto por Oesterreich e Teuteberg (2016), os componentes do modelo de pesquisa em *smart factory*, desenvolvido por Osterrieder et al. (2020) e os fatores e elementos da Indústria 4.0, indicados no artigo de Horváth e Szabó (2019). Para a sistematização dentro das áreas da TOC, foi adotada a abordagem de Blackstone (2001), ampliada por Ikeziri et al. (2019). Os resultados detalhados desta análise de conteúdo são mostrados na íntegra nos quadros do Apêndice A.

### 3.3. DISCUSSÃO

A seguir, os resultados dos artigos da amostra serão integrados seguindo o *framework* de Oesterreich e Teuteberg (2016).

- ***Smart factory***

Como esperado, pela relação direta do conceito com manufatura, as tecnologias voltadas à *Smart Factory* foram abordadas mais recorrentemente na literatura de TOC ligadas às operações. Um primeiro ponto a ser discutido é a capacidade da TOC de ampliar a flexibilidade de operações baseadas em customização em massa, podendo ser integrado com outras abordagens como o *lean manufacturing* (EIDELWEIN et al., 2018; STUMP; BADURDEEN, 2012). Stump and Badurdeen (2012) alertam que o uso de TOC pode ser limitado em ambientes de customização em massa por haver mudanças constantes nos gargalos, situação em que as heurísticas de programação da TOC podem não ser tão apropriadas (GOLMOHAMMADI, 2015). A TOC também se mostrou vantajosa em aplicações de Robótica (NOH; KIM; JANG, 2017).

Por sua vez, tecnologias ligadas à *Smart Factory* como a IoT e o uso de sensores podem apoiar a implementação da TOC por meio do monitoramento do sistema e detecção de restrições (TSAI; LU, 2018). Chou et al. (2016) também observa impacto de novas tecnologias na identificação de gargalos por meio da combinação de RFID e simulação para incrementar a agilidade em condições de alta incerteza como os de *lead time* variável. Como as aplicações de IoT podem ter seu custo reduzido pela aplicação de princípios de TOC (BALAJI et al., 2018; SAIF et al., 2019), temos um ciclo em que TOC apoia a implementação de IoT que por sua vez gera dados úteis para as diversas aplicações de TOC.

A forma como a TOC lida com a incerteza no ambiente produtivo também foi abordada nos artigos que compõem a amostra. Há evidências empíricas da efetividade do TPC em ambientes com flutuações estatísticas e interdependência entre recursos, quando o desempenho é medido com indicadores sistêmicos como o *throughput* (HILMOLA; GUPTA, 2015). A capacidade de adaptação dos sistemas gerenciados segundo premissas da TOC também foi explicitado na literatura sobre *Supply chain* (TSOU, 2013). Ainda, soluções como a modularização de sistemas podem reduzir incertezas devido sua simplificação e a TOC pode auxiliar na implementação de estratégias deste tipo com suas ferramentas lógicas (EIDELWEIN et al., 2018).

Destaca-se na amostra o uso da TOC como base para implementação de tecnologias para produção. O Processo de Melhoria Contínua representado pelos passos de focalização foi citado como base de aplicação por artigos da amostra (BALAJI et al., 2018; NOH; KIM; JANG, 2017). Saif et al. (2019) aplicam heurísticas baseadas nos princípios de TPC para criar um plano efetivo de implementação de IoT. O método criado pelos autores permite a atualização da programação em tempo real. Este resultado também explicita uma potencial vantagem de IoT em ambientes TOC que é o aprimoramento da gestão dos dados de chão de fábrica em termos de sua acurácia e velocidade de transmissão. Além disso, meios digitais e móveis facilitam a coleta de dados para aplicações de TOC (GROOP; REIJONSAARI; LILLRANK, 2010). Os benefícios da aplicação conjunta de TOC e IoT também foram discutidos por Balaji et al. (2018). Segundo esta pesquisa, a TOC indicaria como identificar os pontos do sistema que com maior efetividade da aplicação de IoT, para garantir que esta tecnologia gere ganhos de produtividade. Por sua vez, a IoT permitiria o monitoramento dos gargalos.

Além das implementações conjuntas com IoT, foi possível encontrar outros artigos na amostra com contribuições da TOC para a otimização do processo produtivo com outras tecnologias, fator elencado por Horváth and Szabó (2019). Por exemplo, Hilmola and Gupta (2015) verificam por meio de simulação o impacto da abordagem TPC para redução de refugo na produção. Outro artigo da amostra também verifica a vantagem da TOC para avaliação de novas tecnologias que devem ser empregadas para aliviar as restrições da produção (GROOP; REIJONSAARI; LILLRANK, 2010). Outra aplicação voltada para melhorar o desempenho da manufatura é a aplicação de TOC para modularização, aprimorando a capacidade de desenvolvimento de novos produtos (EIDELWEIN et al., 2018)

*Thinking Process* foi outra área da TOC com contribuição relevante para tecnologias relacionadas à *Smart Factory*. Eidelwein et al. (2018) utilizam ferramentas como a *Current Reality Tree* (CRT), para estabelecer a relação de causas e efeitos que geram efeitos indesejáveis, e *Future Reality Tree* (FRT) para identificar condições e ações que geram efeitos desejáveis. Avanços da Indústria 4.0, como a modularização aplicada por Eidelwein et al. (2018), podem ser usados como “injeções”, que, segundo a literatura sobre os TP (KIM; MABIN; DAVIES, 2008), são ações adicionadas na FRT para solucionar causas raízes explicitadas na CRT.



Como gaps para pesquisas futuras sobre TOC e *Smart Factory*, destaca-se a falta de pesquisas sobre manufatura aditiva. O impacto desta tecnologia na descentralização da manufatura (KHAJAVI; PARTANEN; HOLMSTRÖM, 2014) merece ser discutida sob a ótica da TOC, particularmente por sua abordagem para gestão da cadeia de suprimentos.

- **Simulação**

Dos *clusters* propostos, aquele com relação menos explorada pela literatura de TOC foi a de simulação. A maioria das menções ao termo simulação estão relacionados ao método empregado na pesquisa e não a uma aplicação prática da simulação como tecnologia (HILMOLA; GUPTA, 2015; TSOU, 2013) e suas implicações para a gestão de operações. Houve uma citação explícita do uso de simulação para avaliação de desempenho antes e depois de uma implementação de TOC (STUMP; BADURDEEN, 2012).

As principais contribuições neste cluster estão relacionados ao uso de *data analytics* e inteligência artificial para tomada de decisão. Para aplicações em problemas de cadeia de suprimentos, foi identificado na amostra a aplicação de mineração de dados de séries temporais para determinação do NA (TSOU, 2013). Neste caso, a tecnologia permite o ajuste mais rápido e dinâmico dos pulmões, tornando o sistema mais responsivo. Os resultados de Tsai and Lai (2018) destacam a importância da análise de dados para a identificação e rompimento de restrições. Apesar disso, Hilmola and Gupta (2015) afirmam que os modelos de inteligência artificial têm competido com as heurísticas da TOC na decisão de mix de produtos.

Seria importante que pesquisas posteriores identifiquem em quais ocasiões algoritmos baseados em IA são superiores e quais são inferiores e mesmo como integrar diferentes algoritmos. Este tipo de integração já foi testado pela união de modelos de otimização aplicando custeio ABC e TOC combinado com sistemas MES avançados, com controle de WIP e monitoramento de *status* da fábrica. Importante destacar que a integração da TOC com métodos matemáticos complexos encontra resistência por parte dos estudiosos e praticantes desta abordagem devido a TOC ter como um de seus pilares a simplicidade e a busca por soluções boas o suficiente em detrimento de soluções ótimas (NAOR; BERNARDES; COMAN, 2013).

Há uma lacuna importante sobre os usos de simulação que costumamos associar à Indústria 4.0, como em *digital twins* e aparelhos de realidade virtual. Há um grande

potencial para pesquisas futuras que integrem estas tecnologias com as premissas da TOC. O uso de realidade aumentada, por exemplo, pode apoiar a gestão visual do estado das ordens de produção e consumo de pulmões. Apesar da TOC geralmente evitar soluções matematicamente complexas, a TOC pode guiar um uso útil de ferramentas de simulação para garantir que as questões certas estão sendo respondidas e que as soluções obtidas são realmente viáveis.

Também não foram encontradas pesquisas na amostra relacionando TOC com *Building Information Management* (BIM). Por ser uma tecnologia diretamente ligada com gestão da construção, ela oferece informações técnicas importantes para estimativas de custo e tempo para projetos (WANG et al., 2016c). A relação com Corrente Crítica deve ser mais bem discutida por pesquisas futuras, assim como já foi discutida com outras abordagens de gestão como o *lean* (SACKS et al., 2010).

- **Digitalisation**

Nos artigos relacionados a área de operações, temos alguns exemplos de aplicações de tecnologias digitais em ferramentas específicas de TOC. Além disso, a digitalização do processo produtivo, com o uso de sensores e geração de *big data*, permite *feedback* constante para o planejamento da produção baseado em TOC (TSAI; LAI, 2018) e o monitoramento em tempo real da utilização de capacidades (SAIF et al., 2019; TSAI; LU, 2018). O monitoramento de WIP e conhecimento do *status* da fábrica é relevante para as ferramentas de controle da TOC baseada em pulmões. Com relação ao processamento em tempo real de *big data*, ainda podemos citar o trabalho de Li et al. (2017) que criaram um algoritmo baseado em TOC para eliminar restrições computacionais a este objetivo.

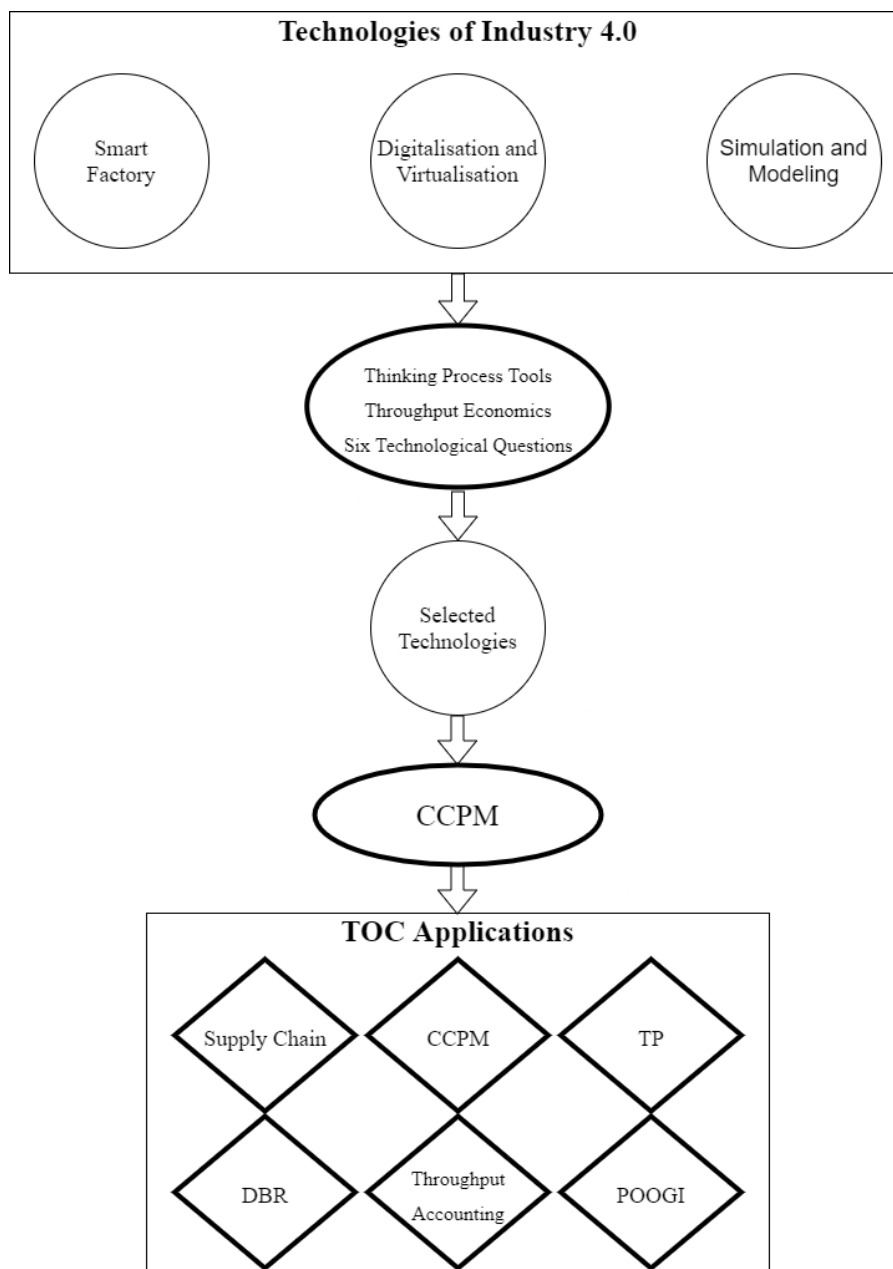
A TOC também apoia a implementação efetiva de tecnologias digitais. Groop et al. (2010), por exemplo, analisam a implementação de tecnologia móvel em *healthcare* com objetivo de aumentar a produtividade das restrições. Mais uma vez, a lente da TOC permite direcionar as aplicações tecnológicas para pontos mais críticos. A TOC também foi aplicada, por meio de um sistema puxado pela demanda e GP, para aplicações de computação em nuvem, a fim de garantir que não haja falta de memória para os clientes, sem haver conflitos com os objetivos financeiros da organização que oferece o serviço (CHANG; CHANG; CHANG, 2017). A possibilidade de eliminar conflitos entre objetivos aparentemente contrastantes de *stakeholders* da Indústria 4.0 é um aspecto da TOC com potencial relevante.

Artigos sobre o POOGI relacionados à digitalização reforçam o impacto positivo mútuo entre TOC e tecnologias recentes. Li et al. (2017) adota TOC para gerenciar gargalos de uma topologia para processamento em tempo real de *big data*. Por sua vez, as informações acuradas sobre o sistema de produção (por exemplo, custo de produção) providas por este tipo de tecnologia de informação baseada em *big data* apoia a identificação e o rompimento de restrições (TSAI; LU, 2018).

Entre as tecnologias relacionadas ao *cluster* de digitalização, destaca-se a ausência de estudos sobre mídias sociais e sua relação com TOC. Implementações deste tipo de rede por meio de gestão de projetos por corrente crítica podem ser analisados em termos de sua efetividade. Além disso, redes sociais têm sido usadas pelas organizações para melhorar a colaboração e comunicação entre as pessoas, com um potencial importante a ser explorado em sistemas gerenciados segundo a TOC. A integração com as ferramentas dos TP, que também envolvem colaboração (CHOE; HERMAN, 2004), também pode ser investigada futuramente.

As áreas da TOC que não foram identificadas na amostra estudada podem ser alvo de pesquisas futuras. Um exemplo é a ausência de artigos sobre CCPM, apesar de já haver pesquisas discutindo diretamente tecnologias da Indústria 4.0 em gestão de projetos (CABEÇAS; MARQUES DA SILVA, 2021; MARNEWICK; MARNEWICK, 2019; VRCHOTA et al., 2020). Outras áreas de aplicação da TOC não contempladas nesta pesquisa foram Finanças, *Marketing*, Vendas e Gestão de Pessoas.

A partir dos resultados aqui descritos, propõe-se um *framework* que resume o estado atual da literatura na interface entre TOC e as tecnologias ligadas à Indústria 4.0. O *framework* está representado visualmente na Figura 15.

Figura 15 - *Framework* de integração de TOC e Indústria 4.0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Primeiramente, a TOC, por meio de suas ferramentas dos TP, *throughput economics* e pelas seis questões tecnológicas, permite que a análise e seleção de tecnologias esteja subordinada às premissas gerenciais que realmente elevem o desempenho da operação. Com isso, evita-se a adoção de tecnologias somente por sua popularização, além de permitir uma melhor visualização de possíveis efeitos colaterais de seu uso. A TOC, ainda, por meio da CCPM, pode apoiar diretamente a condução dos projetos de implementação das tecnologias selecionadas. Esta relação entre CCPM e aplicações de tecnologia 4.0 é uma das lacunas mais relevantes encontradas nesta

pesquisa. Pesquisas futuras poderão verificar empiricamente as vantagens e desvantagens do uso de TOC para gestão dos projetos de implementação destas tecnologias. Por fim, o uso de tecnologias também pode auxiliar na implementação das diversas aplicações de TOC. De forma geral, as principais contribuições conhecidas são para a área de manufatura, por meio do monitoramento em tempo real dos processos e fornecimento de dados mais confiáveis para identificação de restrições e dimensionamento e controle de pulmões. Observa-se uma relação cíclica entre os dois temas em que a TOC auxilia na seleção e implementação de tecnologias que podem ser usadas para execução das premissas da TOC.

A revisão sistemática realizada é a primeira a destacar os pontos de integração entre a adoção das tecnologias emergentes da Indústria 4.0 e as ferramentas e princípios da TOC. Uma amostra de 16 artigos foi obtida por um procedimento sistemático e reproduzível. A análise desta amostra explicitou uma relação de via dupla entre os dois temas. A literatura atual descreve a TOC como guia para uma implementação de tecnologias a serviço do desempenho operacional, permitindo uma seleção mais criteriosa e imparcial destas soluções. Esta revisão ainda traz diversos exemplos de usos de tecnologias que aprimoram as aplicações de TOC, com especial menção àquelas que melhorem a qualidade e velocidade dos dados usados nestas aplicações.

Desta forma, os resultados desta revisão contribuem tanto a gestores interessados em adotar tecnologias da indústria 4.0 em suas organizações quanto praticantes de TOC. Muitos dos que adotam TOC ainda desconhecem as soluções tecnológicas descritas nesta revisão. Para acadêmicos, a pesquisa realizada explicita avenidas de pesquisa na interface entre TOC e Indústria 4.0, indicando quais áreas da TOC ainda não foram exploradas no contexto destas novas tecnologias. Programas educacionais em TOC e Indústria 4.0 podem incorporar a integração aqui descrita em seus currículos. Como potenciais limitações desta pesquisa, podemos citar vieses comuns às revisões sistemáticas como certa subjetividade nos filtros e palavras-chave utilizados e na análise dos resultados.

Percebe-se que os trabalhos geralmente tratam a TOC e mais especificamente sua abordagem para o PCP de forma geral, sem realizar análise detalhada dos métodos propostos. A maioria dos trabalhos sequer trata de métodos específicos, mas tratam a TOC como contexto da pesquisa ou usam apenas os 5FS e outros princípios básicos para análise. Assim, um *gap* identificado nessa revisão é a falta de trabalhos que abordem com maior detalhamento a relação entre tecnologias da Indústria 4.0 com os

métodos da TOC. Nesse contexto, analisar as atividades de TPC/GP individualmente seria salutar. Ainda, nenhum artigo considerou a forma simplificada do TPC. Outras áreas da TOC também carecem de investigação como *throughput economics*, gestão de projetos, *Marketing*, venda e gestão de pessoas.

Além disso, uma lacuna identificada é que há grupos tecnológicos da Indústria 4.0 que ainda não foram explorados nas pesquisas sobre TOC. Sendo assim, o impacto de soluções como automação e robótica avançada (*cobots*), realidade virtual e aumentada, dispositivos móveis e computação em nuvem nos métodos propostos pela TOC poderia ser investigado.

Pesquisas futuras podem aprofundar as relações aqui identificadas com especialistas, buscando levantar quais tecnologias são mais prioritárias para as aplicações de TOC. Pesquisas empíricas voltadas ao levantamento de barreiras e *drivers* para implementação das tecnologias discutidas aqui em ambientes TOC são bem-vindas.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

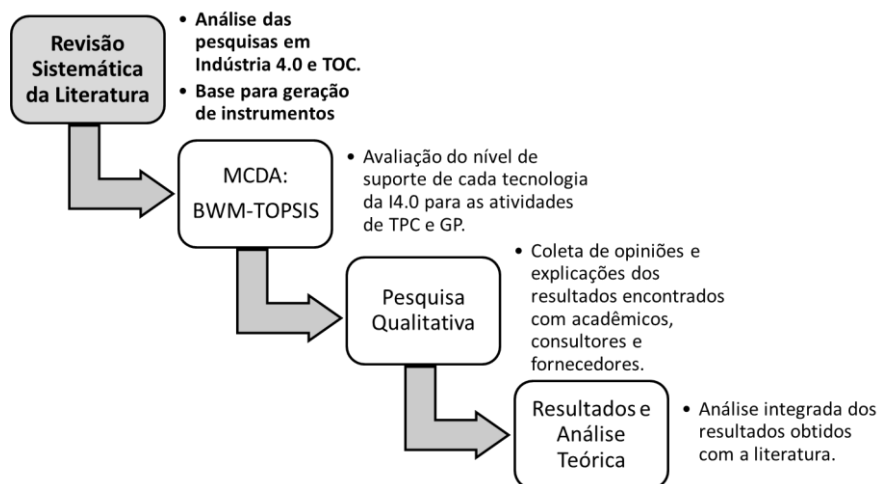
Nesta seção, é apresentado o método de pesquisa aplicado. A pesquisa pode ser considerada exploratória, visto que aqui se pretende procurar padrões e tendências, que possam gerar ideias e hipóteses para trabalhos futuros (MARCONI; LAKATOS, 2003). Para isso, pretendeu-se consultar especialistas, coletando dados quantitativos (métodos de tomada de decisão multicritério) e qualitativos (aplicação de questionário com questões abertas). O método é dividido em duas etapas, uma quantitativa apresentada na seção 4.1., e outra qualitativa, consistindo na aplicação de um questionário com questões abertas junto aos especialistas, apresentada na seção 4.2.

A seção 4.1. apresenta uma abordagem multicritério que integra os métodos *Best-Worst Method* (4.1.1.) e TOPSIS (4.1.2.). Na seção 4.1.3., detalhes sobre a construção dos instrumentos de pesquisa e coleta de dados são mostrados. Métodos de tomada de decisão multicritério foram escolhidos pois eles são utilizados para a avaliação de um problema complexo por diferentes dimensões, além de permitirem a caracterização e priorização de critérios de avaliação e a seleção e definição de opções por parte de especialistas consultados (STIRLING, 2006). Assim, foi possível analisar objetivamente um problema relativamente novo, com dificuldade de se encontrar casos empresariais acessíveis para observação direta que se encontram na intersecção dos temas estudados (aplicações de tecnologias da Indústria 4.0 para o TPC/GP), fazendo uso de uma técnica exploratória com avaliação de especialistas. Nesta tese, procurou-se integrar na mesma análise um número considerável de conceitos e tecnologias, o que é particularmente beneficiado por uma abordagem multicritério.

Por fim, a seção 4.2. explica a etapa qualitativa da pesquisa, com consulta dos especialistas por meio de questionário. Embora a abordagem BWM-TOPSIS permita a análise de priorização entre as atividades e tecnologias estudadas, ela não fornece possíveis causas para determinada classificação dos elementos estudados. Assim, optou-se pela análise qualitativa complementar com a coleta da opinião dos especialistas. Ela se mostrou também útil para avaliar aspectos mais gerais com relação à interação entre aplicações de TOC e as novas tecnologias.

Como forma de resumir as etapas da pesquisa, foi elaborado o fluxograma apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Fluxograma das etapas do método de pesquisa



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.1. PROBLEMAS DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

Problemas de tomada de decisão multicritério são aqueles em que se pretende avaliar um conjunto de alternativas, segundo várias dimensões ou critérios, de forma a selecionar qual seria a melhor opção (ZAVADSKAS; TURSKIS, 2011). Normalmente, estes problemas são divididos em contínuos ou discretos, dependendo do espaço de solução trabalhado (STEWART, 1992). Como na presente pesquisa pretende-se apontar quais grupos tecnológicos são mais indicados para apoiar atividades específicas de PCP, trata-se de um problema discreto e serão adotados processos de avaliação multiatributo (WALLENUS et al., 2008).

A avaliação de problemas de tomada de decisão multicritério geralmente envolve a apresentação de preferências por parte de um tomador de decisão, especialista no assunto que se pretende avaliar, por meio de comparações, classificação e seleção de alternativas. De forma a realizar a análise, é necessário obter informações a respeito do desempenho de cada alternativa com relação aos critérios, formando a chamada matriz de desempenho e determinar o peso ou importância de cada critério (MOHAMMADI; REZAEI, 2020). Não necessariamente devem-se aplicar os mesmos métodos para determinação dos pesos dos critérios e para avaliação das alternativas segundo o conjunto de critérios (KOU; PENG; WANG, 2014).

Os métodos de tomada de decisão multicritérios mais conhecidos são o AHP/ANP, TOPSIS, DEMATEL, ELECTRE, PROMETHEE, VIKOR e TOPSIS (WU et al., 2014). Dentre estes métodos, há aqueles baseados em comparações pareadas, que



têm o AHP (*Analytic Hierarchy Process*) como principal referência. O AHP é uma técnica estruturada de organização e análise de decisões complexas, desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1970. Nele, as experiências individuais de especialistas são utilizadas para estimar as magnitudes relativas de fatores por meio de comparações pareadas. Cada um dos entrevistados compara a importância relativa de cada par de itens usando um questionário especialmente elaborado (FORMAN; GASS, 2001).

Neste trabalho, aplica-se abordagem semelhante ao AHP, em que alternativas são comparadas duas a duas com relação a cada critério, resultando em pontuações. Cada critério por sua vez possui um peso próprio e o valor final da alternativa é obtido por agregação aditiva simples, multiplicando a pontuação da alternativa em cada critério com o peso de cada critério e somando (SAATY, 1990). Aqui, adotou-se um método mais recente, também baseado em comparações pareadas, chamado *Best-Worst Method*, que apresenta evoluções com relação ao AHP, como discutido na seção seguinte.

Dentre os principais benefícios de uma abordagem multicritério, pode-se citar a simplicidade e transparência, bem como a flexibilidade, facilidade de uso, oportunidade e custo-benefício (STEWART, 1992). É uma forma eficaz e prática para lidar com situações complexas, dividindo o assunto em critérios e alternativas a sofrerem análise de comparação par a par, que é simples e precisa. A importância de cada critério pode ser percebida com clareza, pois se apresenta na forma de uma estrutura hierárquica e o uso de testes de consistência reduz o viés na tomada de decisões (MARDANI et al., 2015).

#### **4.1.1. *Best-Worst Method* (BWM)**

O *Best-Worst Method* (BWM) é um método de tomada de decisão multicritério proposto por Rezaei (2015). O diferencial do BWM se comparado ao AHP é o menor número de comparações pareadas necessárias e um nível de inconsistência em média mais baixo. Como o próprio nome indica, o decisor deve apontar entre critérios e/ou alternativas, a melhor e a pior opção em sua perspectiva. Estas se tornam referências com as quais os demais itens são comparados. Os critérios ou alternativas intermediárias não são alvo de comparação pareada entre si, o que reduz amplamente o número necessário de avaliações (GUPTA; BARUA, 2017; MOKTADIR et al., 2018).

As comparações pareadas são feitas em duas etapas. O tomador de decisão deve apontar quão mais importante o melhor critério ou alternativa, escolhido previamente

por ele, é com relação a cada um dos demais (incluindo o pior) (REZAEI, 2016). Essa avaliação normalmente é feita usando a escala do AHP, de 1 a 9, proposta por Saaty e apresentada no Quadro 6.

Quadro 6 - Escala de Saaty para comparações pareadas

Valor	Significado	Descrição
1	Igual importância	Os dois critérios contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente um critério em relação ao outro.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente um critério em relação ao outro.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Um critério é muito fortemente favorecido em relação ao outro e sua dominância é demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A evidência favorece um critério em relação ao outro com o mais alto grau de certeza.
2,4,6,8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

Fonte: Saaty (1990) e Rezaei (2015).

Seguem-se as comparações com a pior opção indicada. O respondente indica, usando novamente a escala de 1 a 9, qual mais importante cada um dos demais itens é com relação o pior. Os resultados dessas comparações pareadas entram como dados para resolução de um problema de otimização *maxmin* (ver passos do BWM, a seguir), que resulta nos pesos dados a cada critério ou alternativa (REZAEI, 2015). As pontuações finais, usadas para classificar as alternativas, são obtidas por meio da agregação dos pesos calculados na etapa anterior (PAMUČAR et al., 2020).

Assim como no AHP, Rezaei propôs um cálculo do nível de inconsistência das respostas dadas pelo decisor. É absolutamente normal que ao lidar com a comparação de vários itens ao mesmo tempo, o respondente cometa erros lógicos, atribuindo importância a um dado item sobre outro para mais a frente realizar a comparação invertida, seja por falta de concentração ou por reavaliar a decisão anterior (GROŠELJ et al., 2015). O BWM torna o processo de avaliação mais estruturado, ao fixar referências nos extremos. Isso colabora para que o respondente mantenha foco, reduzindo inconsistências.

Os passos do BWM consistem em (REZAEI, 2015):

1. Determinar um conjunto de critérios de decisão. Toma-se um vetor de critérios:  $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$
2. Determinar o melhor (mais desejável ou importante) e o pior (menos desejável ou importante) entre todos os critérios.
3. Determinar a preferência do melhor critério sobre todos os demais, resultando em um vetor de respostas “Melhor a Outros”  $\rightarrow A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn})$ .
4. Determinar a preferência de todos os critérios sobre o pior, resultando em um vetor de respostas “Outros a Pior”  $\rightarrow A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})^T$ .
5. Encontrar os pesos ótimos para cada critério pela resolução de um problema minmax  $\rightarrow (w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)$ .

Os pesos de dois critérios devem ser tais que a proporção entre eles seja o mais próxima possível do valor atribuído para a comparação entre eles pelo respondente. Isso significa que, tomando um critério  $j$ , temos um problema voltado a minimizar o valor máximo entre  $\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|$  e  $\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right|$ . Duas formas do problema são mostradas nas equações de (1) a (8):

$$\min \max_j \left\{ \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \right\} \quad (1)$$

$$\sum_j w_j = 1 \quad (2)$$

$$w_j \geq 0, \forall j \quad (3)$$

Ou

$$\min \xi \quad (4)$$

$$\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi, \forall j \quad (5)$$

$$\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq \xi, \forall j \quad (6)$$

$$\sum_j w_j = 1 \quad (7)$$

$$w_j \geq 0, \forall j \quad (8)$$

A seguir, é apresentado o cálculo da razão de consistência para o BWM. Na definição de Rezaei (2015), uma comparação é completamente consistente se  $a_{Bj} \times a_{jW} = a_{BW}$ . O ideal seria que essa relação ocorresse para todos os critérios  $j$ . O máximo valor para  $a_{Bj}$  ou  $a_{jW}$  seria  $a_{BW}$ , o que resulta na diferença  $\xi$ . Ao subtrair  $\xi$  de  $a_{Bj}$  e  $a_{jW}$  e resolvendo para diferentes valores de  $a_{BW}$ , encontra-se o valor máximo para a

diferença  $\xi^*$ , que então é chamada de índice de consistência. O índice de consistência (IC), calculado para toda a escala de 1 a 9, é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Índice de consistência (IC)

$a_{BW}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Índice de consistência ( $\xi$ máximo)	0,00	0,44	1,00	1,63	2,30	3,00	3,73	4,47	5,23

Fonte: Rezaei (2015).

Por fim, a razão de consistência é dada pela proporção entre o  $\xi^*$ , obtido pela resolução do problema maxmin e o índice de consistência para a diferença apontada entre o melhor e pior critério.

$$\text{Razão de Consistência (RC)} = \frac{\xi^*}{IC(a_{BW})} \quad (9)$$

O ideal é que RC seja menor que 10%, assim como recomendado por outros métodos de tomada de decisão multicritério como o AHP (FRANEK; KRESTA, 2014; LANE; VERDINI, 1989).

Para a operacionalização da análise dos dados coletados por questionário, foi usada a planilha desenvolvida por Jafar Rezaei, disponível no portal <https://bestworstmethod.com/>. O arquivo em Excel é baseado no BWM linear (REZAEI, 2016) e foi adaptada para comportar o número de critérios avaliados neste pesquisa (passo 1 do BWM). Como valores de entrada da planilha estão a indicação do melhor e pior critérios (passo 2), bem como os vetores de julgamentos “Melhor a outros” (passo 3) e “Outros a pior” (passo 4). Por fim, é utilizada a extensão *Solver* para resolver um modelo de programação linear para cada respondente, encontrando o vetor ótimo de pesos para os critérios (passo 5, indicado acima). Outra saída do modelo é o valor do índice de consistência  $\xi^*$  (ou  $K_{si}^*$ ), base para o cálculo da razão de consistência. Os respondentes que ultrapassaram 10% de RC tiveram que responder novamente ao questionário ou tiveram seu vetor de pesos descartado da análise final. A Figura 16 mostra um exemplo resolvido na planilha, tomando apenas três critérios.

Figura 17 - Resolução do BWM para três critérios

	A	B	C	D
1				
2	Criteria Number = 3	Criterion 1	Criterion 2	Criterion 3
3	Names of Criteria	a	b	c
4				
5	Select the Best	a		
6				
7	Select the Worst	c		
8				
9	Best to Others	a	b	c
10	a	2	1	3
11				
12	Others to the Worst	c		
13	a	3		
14	b	2		
15	c	1		
16				
17	Weights	a	b	c
18		0,33333333	0,5	0,16666667
19				
20	Ksi*	0,16666667		

Fonte: Elaborada pelo autor, adaptado de Mohammadi e Rezaei (2020).

#### 4.1.1.1. Agregando respostas do BWM

Quando há apenas um decisor, suas preferências são diretamente utilizadas para ranquear e escolher as melhores alternativas. Porém, quando mais de um tomador de decisão é incluído no processo, também chamado de decisão em grupo, há a necessidade de se analisar os dados de forma agregada para chegar a uma decisão conjunta (GROŠELJ et al., 2015). Dois tipos de abordagem para decisão em grupo são identificados: abordagem normativa e descritiva. Na abordagem normativa, o grupo terá que tomar uma decisão consensual. Pesam-se as opiniões de todos mais o grupo inteiro tomará uma só decisão. Por exemplo, funcionários do departamento de compras de uma empresa devem selecionar o melhor fornecedor para um determinado item. Já na abordagem descritiva, há o interesse de entender mais claramente as diferentes preferências dentro de um conjunto de pessoas (MOHAMMADI; REZAEI, 2020). Esta pesquisa está mais alinhada à abordagem descritiva, pois se pretende entender a importância dada pelos respondentes das atividades e tecnologias estudadas.

Esta agregação de respostas pode ser feita pelos julgamentos individuais (valor atribuído a cada item no questionário de comparações) ou pelas prioridades individuais (vetor de pesos calculado para cada respondente). Uma forma típica de realizar a análise

agregada das preferências de múltiplos avaliadores é por meio de operadores de valor central, como média aritmética ou geométrica. A técnica mais amplamente utilizada é a de média geométrica ponderada dos julgamentos individuais (ISHIZAKA; SIRAJ, 2018). Outros métodos, como a média aritmética ponderada, o modelo Lehrer-Wagner, o modelo de mínimos quadrados ponderados, o modelo de diferenças e classes preferenciais (*preferential differences and ranks* ou PD&R) e o modelo LP-GW-AHP (baseado em programação linear e análise envoltória de dados), apesar de menos comuns, podem ser mais convenientes, dependendo do contexto (GROŠELJ et al., 2015).

Para o método BWM, não é possível realizar a agregação dos julgamentos individuais, visto que cada respondente escolhe diferentes critérios como Melhor e Pior, não sendo feitas as mesmas comparações por todos os respondentes. Caso seja feita a agregação dos julgamentos, deve-se aplicar a média geométrica ponderada. Já no caso de agregação de vetores de preferências, tanto a média geométrica como a aritmética podem ser adotadas (MOHAMMADI; REZAEI, 2020). Aqui, optou-se pela média aritmética, por dar um peso relativamente maior a pesos pequenos e por reduzir substancialmente a flutuação caso outras amostras fossem coletadas. Grošelj et al. (2015) também apontam que quando a avaliação envolver mais de um grupo, é recomendável agregar os julgamentos dentro do grupo e então agregar os vetores de preferências entre grupos. A agregação por vetor de pesos também seria preferível para avaliar dentro de um grupo, caso ele não seja suficientemente homogêneo, composto de partes interessadas de diferentes campos.

No estudo de Groselj et al. (2015), que comparou diversas técnicas de agregação de decisões em grupo para o AHP, os autores propuseram duas técnicas de dois estágios, para avaliar grupos não homogêneos, chamadas WGM-WAM e WGM-LH. Nas duas abordagens, os vetores de prioridades de cada respondente são agregados por média aritmética ponderada, o que gerou os melhores resultados.

Assim, para cada critério em estudo, foi calculada a média aritmética dos pesos ótimos conferidos por cada respondente, seguindo a indicação de Grošelj et al. (2015) e Ishizaka e Labib (2011). Dessa forma, estabeleceu-se um *ranking* inicial das atividades do TPC/GP, indicando quais poderiam ser priorizadas em potenciais implantações. Como foram utilizadas médias para agregação dos pesos atribuídos pelos respondentes, fez-se necessário avaliar se as diferenças eram significativas. Para isso, são aplicados

testes de hipóteses paramétricos (ANOVA de um fator e teste F) e não paramétricos (testes de Friedman e Conover-Iver, por exemplo).

A determinação dos testes apropriados depende do teste de pressupostos, como homoscedasticidade (teste de Levene) e normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk), que foram aplicados e, de acordo com os resultados, levaram ao uso dos testes não paramétricos (Friedman e Conover-Iman). O teste de Friedman (FRIEDMAN, 1937) é utilizado para experimentos de medidas repetidas, o que se aplica no presente caso, já que cada respondente forma um bloco de medidas (pesos) referentes a diferentes tratamentos (atividades). Um exemplo de uso desse teste seria o caso de *n* *sommeliers* atribuindo nota para *k* diferentes vinhos e deseja-se verificar quais vinhos são consistentemente mais bem avaliados ou o caso de *n* soldados usando *k* tochas de soldagem, e as soldas resultantes classificadas quanto à qualidade. Para identificar quais atividades apresentaram diferenças, devem-se realizar testes *post-hoc* de comparação pareada. Escolheu-se o teste de Conover-Iman (CONOVER; IMAN, 1979), por se aplicável após testes não paramétricos como o de Friedman. Além disso, este teste apresenta maior poder de comparação entre os diferentes tratamentos, sendo aplicável nessa situação com 16 tratamentos sendo comparados.

Detalhes sobre a escolha dos testes são explicados na seção de resultados. Realizando os testes de hipóteses pareados para os critérios, foram identificados pares de atividades com diferenças significativas no peso médio. Para realização dos testes de hipóteses e dos pressupostos de teste, foram utilizados os pacotes *PMCMRplus* e *onewaytests* do *software* estatístico R. O *script* de programação utilizada na análise dos resultados do BWM é mostrado no Apêndice B.

Por fim, para a configuração de hierarquia entre as atividades, foi utilizado o algoritmo *compact letter display*, que permite a identificação de classes de priorização por meio de letras apropriadamente atribuídas a cada atividade. O procedimento apresenta os seguintes passos: a) ordenar os tratamentos por mediana ou média (nesta pesquisa foi adotada a média); b) atribuir ao tratamento de maior média a letra A; c) observar a comparação entre esse tratamento e o próximo de maior média. Se eles não forem diferentes, atribuir a esse segundo tratamento letra A; se eles forem diferentes, não atribua nenhuma letra; d) continuar comparando cada tratamento ao primeiro; e) Ir para o segundo tratamento com maior média, atribuir a ele a letra B e seguir o mesmo procedimento de comparação de cada um dos tratamentos com o segundo maior; f) fazer o mesmo para todos os tratamentos; g) Remover as letras que estão incluídas em

outra letra. Por exemplo, se todos os B's também têm A's, é possível remover todos os B's. Cada letra indicará um "subconjunto homogêneo". Pode haver um tratamento em mais de um subconjunto. Por exemplo, pode-se terminar com um tratamento AB, que está tanto no grupo A quanto no grupo B.

Além da análise hierárquica das atividades, proporcionada pela análise via BWM, os vetores de pesos individuais dos respondentes também serviram de entrada para a análise TOPSIS, a ser detalhada a seguir.

#### **4.1.2. TOPSIS**

Em posse dos pesos atribuídos pelos respondentes para cada atividade do TPC e GP, seguiu-se a avaliação do nível de suporte potencial das tecnologias para cada atividade. Para realizar essa análise, foi aplicado o método TOPSIS, acrônimo em inglês para "*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*" ou técnica para ordenar preferência por similaridade a solução ideal. Este método de tomada de decisão multicritério foi apresentado por Chen e Hwang (1992), com referência a Hwang e Yoon (1981).

O princípio básico do TOPSIS consiste em comparar um vetor de preferências a soluções extremas, tanto positivas como negativas. A alternativa escolhida é aquela que apresentar menor distância da solução ideal positiva e maior distância da solução ideal negativa. O TOPSIS foi escolhido pela sua simplicidade e eficiência computacional, bem como facilidade de compreensão por parte dos respondentes, o que é especialmente importante quando a coleta é assíncrona e com número expressivo de participantes (SHIH; SHYUR; LEE, 2007). Além disso, diferentemente do AHP, no TOPSIS, as alternativas receberão pontuações, com base nos critérios, formando o que se denomina matriz de decisão. Usando o método TOPSIS, a partir da matriz de decisão podemos priorizar alternativas, tratando diversas dimensões de análise de forma integrada (LAI; LIU; HWANG, 1994). Ainda, os cálculos necessários são reduzidos, pois se pode estabelecer uma hierarquia a partir da matriz de decisão, sem usar comparações pareadas nessa fase (KOU et al., 2012). Por fim, este método foi aplicado com sucesso em diversos estudos de gestão de operações (CHAUHAN; SINGH, 2016; GUPTA; BARUA, 2017; ROSTAMZADEH; SOFIAN, 2011; YOU et al., 2017) e tem sido aplicado em pesquisas sobre as tecnologias da Indústria 4.0 (KAYA et al., 2020; KUMAR; SINGH; LAMBA, 2018; YILDIZBAŞI; ÜNLÜ, 2020).



Considerando uma análise para  $J$  alternativas (no presente estudo, os grupos tecnológicos da Indústria 4.0) e  $n$  critérios (aqui, as atividades do TPC/GP), os passos de resolução do TOPSIS incluem:

- (1) Calcular a matriz de decisão normalizada. O valor normalizado  $r_{ij}$ , tomando a avaliação de uma alternativa  $j$  sob um critério  $i$  é calculado pela expressão:

$$r_{ij} = f_{ij} / \sqrt{\sum_{j=1}^J f_{ij}^2}, j = 1, \dots, J; i = 1, \dots, n. \quad (10)$$

Onde  $f_{ij}$  é o valor do critério  $i$  para a alternativa  $j$ . No presente estudo, foi utilizada a escala linguística, sendo muito baixo ( $f_{ij} = 1$ ), baixo ( $f_{ij} = 2$ ), médio ( $f_{ij} = 3$ ), alto ( $f_{ij} = 4$ ) e muito alto ( $f_{ij} = 5$ ).

- (2) Calcular a matriz de decisão normalizada ponderada. Considerando  $w_i$  o peso atribuído ao critério  $i$ , o valor normalizado ponderado  $v_{ij}$  é dado por:

$$v_{ij} = w_i r_{ij}, j = 1, \dots, J; i = 1, \dots, n. \quad (11)$$

Ressalta-se que os pesos dos critérios foram obtidos na etapa anterior, pela aplicação do BWM.

- (3) Determinação da solução ideal positiva e negativa:

$$A^+ = \{v_1^+, \dots, v_n^+\} = \{(jmax|i \in I'), (jmin|i \in I'')\} \quad (12)$$

$$A^- = \{v_1^-, \dots, v_n^-\} = \{(jmin|i \in I'), (jmax|i \in I'')\} \quad (13)$$

Onde  $I'$  é o conjunto de critérios de benefício e  $I''$  é o conjunto de critérios de custo. No caso específico desta pesquisa, só há critérios de benefício (que devem ser maximizados) e os valores máximo e mínimo que os valores podem ter são 5 e 1, respectivamente.

- (4) Cálculo de medidas de separação usando a distância euclidiana  $n$ -dimensional. A separação do vetor de avaliações de cada alternativa da solução ideal é dada por:

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^+)^2}, j = 1, \dots, J. \quad (14)$$

Analogamente, a distância de cada alternativa para a solução ideal negativa é calculada por:

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^-)^2}, j = 1, \dots, J. \quad (15)$$

(5) Calcular a proximidade relativa à solução ideal. A proximidade relativa da alternativa  $j$  à solução ideal positiva é dada por:

$$P_j^+ = D_j^- / (D_j^+ + D_j^-), j = 1, \dots, J. \quad (16)$$

Ao ordenar as alternativas em ordem decrescente de proximidade relativa à solução ideal positiva, obtém-se o *ranking* de preferência.

Para auxílio na aplicação do método, foi utilizado o pacote “*topsis*” (*TOPSIS method for multiple-criteria decision making (MCDM)*) do *software* estatístico R. Pacotes R são coleções de funções e conjuntos de dados desenvolvidos pela comunidade, utilizando a linguagem de programação R. A própria comunidade aumenta a potência do programa, melhorando as funcionalidades de base do R ou adicionando novas. Normalmente, um pacote inclui código (não somente código em R), documentação para uso do pacote e as funções internas, alguns testes para verificação e conjuntos de dados. O pacote “*topsis*” foi desenvolvido por Mahmoud Mosalman Yazdi, publicado em 2013, tendo como principal referência o livro de Yoon e Hwang (1995).

A função *topsis* foi aplicada, tendo como argumentos a matriz numérica com 10 linhas para 10 alternativas e 16 colunas para 16 critérios, o vetor numérico contendo os pesos para os critérios, com comprimento igual ao número de colunas na matriz de decisão e um vetor de caracteres de “+” e “-” indicando a forma como cada critério influencia as alternativas (critérios de benefício ou custo). A saída que o pacote fornece inclui um *data frame* composto do *score* de cada alternativa (medida da proximidade relativa), bem como sua classificação. O *script* completo utilizado para analisar os dados desta pesquisa é mostrado no Apêndice C.

Os *scores* de cada respondente foram agregados por média aritmética, formando um *ranking* geral de alternativas, descrevendo a avaliação do grupo. Como a média para duas alternativas poderia não apresentar diferenças significativas, foi realizada análise

de variância e testes de hipótese, de forma análoga ao realizado para os pesos calculados na etapa BWM. O *script* em R para essas análises é apresentado no Apêndice D. Foram utilizados os pacotes básicos do R, bem como o pacote “*PMCMRplus*”, para testar a normalidade dos vetores de *scores* (teste de Shapiro-Wilk), a homogeneidade das variáveis e realizar os testes de hipóteses. Se pelo menos uma das variáveis não apresentou normalidade, optou-se por aplicar o teste de Friedman e, caso houvesse diferenças significativas entre pelo menos duas alternativas, o teste de Conover-Iman. Estes testes não paramétricos são indicados para os casos de comparações entre três ou mais grupos com correspondência (*matched groups*). Eles fornecem a estatística ideal para um tipo de experimento com medidas repetidas, para determinar se um determinado fator tem um efeito (SCHEFF, 2016), como é o caso da presente pesquisa. Mais detalhes sobre o uso dos testes são explicados na seção 5.1. Ressalta-se que a classificação das tecnologias da Indústria 4.0, aplicando o algoritmo *compact letter display*, também foi utilizada para formar *clusters* tecnológicos por grau de importância, a partir das pontuações geradas por TOPSIS.

Importante reforçar que as classes de tecnologias representadas pelos *clusters* devem considerar que as tecnologias possuem complementaridades, muitas vezes devendo ser aplicadas de maneira conjunta. O que se propõe aqui é uma classificação a ser aplicada na alocação de recursos e atenção gerencial, sem desconsiderar as interdependências existentes.

#### **4.1.3. Definição dos construtos e elaboração e envio do questionário**

A aplicação do método BWM-TOPSIS pressupõe, assim como outros métodos de comparação pareada para tomada de decisão com múltiplos critérios, uma hierarquia, elaborada para indicar alternativas, que serão comparadas com relação aos critérios, com relação a um objetivo.

Primeiramente, o objetivo indicado na hierarquia reflete o objetivo de pesquisa da tese sendo redigido como: Realizar uma implantação bem-sucedida de Tambor-Pulmão-Corda, visando melhoria do desempenho organizacional segundo a TOC (aumento do ganho e redução de inventário e despesas operacionais). Os especialistas participantes da pesquisa deveriam considerar esse objetivo ao realizar as avaliações.

Em seguida, seguiu-se a determinação dos critérios usados como parâmetro para avaliação das alternativas. Nesta pesquisa, os critérios são as próprias atividades do

TPC, TPC-S e GP. Estes critérios foram comparados entre si pelos especialistas, estabelecendo pesos individuais, por meio do método BWM. Procurou-se, por meio de análise detalhada da literatura, extrair um conjunto amplo de atividades que caracterizassem as práticas de PCP adotadas pela TOC. Estas atividades selecionadas são apresentadas na hierarquia mostrada no Quadro 7.

Alguns *frameworks* teóricos que procuraram resumir as atividades do TPC basearam a redação das atividades. Dos *frameworks* de Duclos e Spencer (1995), Schragenheim e Ronen (1990) foram extraídas as atividades mais básicas do TPC, ligadas ao estabelecimento de Tambor, Pulmões e Corda. Já de Schragenheim e Ronen (1991), destacaram-se atividades específicas relacionadas ao gerenciamento de pulmões, como a priorização de ordens e a necessidade de ações gerenciais, bem como para guiar melhoria contínua. Outras referências foram importantes para definir atividades do TPC clássico (CHAKRAVORTY; ATWATER, 2005; GOLDRATT; COX, 1990; MABIN; DAVIES, 2003).

Outras contribuições teóricas permitiram a inclusão de atividades de controle do WIP e gestão da capacidade protetiva (BETTERTON; COX, 2009; BLACKSTONE; COX, 2002) e as políticas de lote previstas pela TOC (GOLDRATT; GRASMAN, 1986; RONEN; STARR, 1990; WATSON; BLACKSTONE; GARDINER, 2007). Especificamente para atividades ligadas ao MTA, utilizou-se a referência de Schragenheim (2010), além de outros capítulos do Manual da TOC (COX; SCHLEIER, 2010). Por fim, o dicionário da TOCICO (COX et al., 2012) forneceu, por meio de seus verbetes, o detalhamento de várias atividades do TPC. As atividades destacadas da literatura são apresentadas no Quadro 3 e detalhadas na seção 2.2.2.

Também, tomou-se o cuidado de não incluir princípios gerais usados no TPC, que por serem conceituais, não teriam suporte tecnológico potencial. Como alguns exemplos, citam-se a necessidade diferenciar ativação de utilização de recursos restritivos, o balanceamento do fluxo e não da capacidade e a programação de atividades e capacidade devendo ser considerada de forma simultânea e não sequencial.

Com relação às alternativas, a serem avaliadas por meio do método TOPSIS, foi feita uma análise sistemática da literatura, com foco em trabalhos que apresentaram *frameworks* e construtos aplicados em pesquisas empíricas, tentando sintetizar o fenômeno da Indústria 4.0. Optou-se por uma abordagem mais objetiva, dado o grande número e variedade de publicações que tratam das tecnologias inovadoras, em áreas de pesquisa muito diversas. O método aplicado foi detalhado na seção 2.1.1., visto que o

resultado dessa sistematização também serviu para orientar a revisão teórica sobre as tecnologias. O Quadro 1 apresenta as tecnologias da Indústria 4.0 identificadas na revisão sistemática, bem como as três classes em que foram divididas. Como explicado naquela seção, os grupos de conceitos que refletiam soluções tecnológicas aplicáveis no conceito do PCP (classe 3) incluíram: “Simulação, realidade virtual e realidade aumentada”, “*Big data e data analytics*”, “*Internet das Coisas*”, “Robótica e automação avançada”, “Computação e manufatura em nuvem”, “Manufatura aditiva”, “Sistemas de controle da produção (MES/SCADA/ERP)”, “IA e aprendizagem de máquina”, “Cibersegurança”, “Tecnologias de identificação e rastreamento”, “Tecnologias móveis”, “Soluções de gestão de energia”, “Gestão do ciclo de vida de produto” e “Sistemas integrados de desenvolvimento de produtos e manufatura”. Estas 14 tecnologias integraram uma primeira versão da hierarquia, que foi submetida a teste piloto.

O teste piloto do questionário contou com a participação de sete especialistas em TOC, entre acadêmicos e praticantes. Além de fornecerem dados para uma análise inicial, de forma a certificar a adequação do *script* em R efetivamente usado na amostra final, os especialistas forneceram *feedback* a respeito da redação do instrumento de pesquisa. Foram sugeridas algumas mudanças de *design*, para que o respondente pudesse acompanhar o andamento da resposta.

Os dados coletados foram submetidos à análise BWM-TOPSIS, o que resultou em pesos e *scores* médios. O *score* médio é a média aritmética das medidas de proximidades calculadas por TOPSIS. A partir dos *scores* médios, decidiu-se pela redução no número de tecnologias. Foram retiradas as tecnologias de gestão do ciclo de vida do produto, soluções em gestão de energia e manufatura aditiva, por não apresentarem contribuição significativa com relação ao *score* médio dado pelo TOPSIS (menos de 1% do total). Também foi eliminada a tecnologia de cibersegurança por apresentar *score* zero para três respondentes.

Dessa forma, a hierarquia final é composta por 10 grupos tecnológicos (com base nos conteúdos do Quadro 2), que são mostrados na coluna Tecnologias da Indústria 4.0 do Quadro 7 e por 16 atividades do TPC/GP (baseadas nos elementos do Quadro 3), mostrados na coluna Atividades do TPC/GP.

Quadro 7 - Hierarquia de atividades e tecnologias para o método BWM-TOPSIS

Atividades do TPC/GP (critérios)	Tecnologias da Indústria 4.0
----------------------------------	------------------------------

	(alternativas)
Identificar o recurso com restrição de capacidade (RRC) (A1)	Simulação, realidade virtual e realidade aumentada (T1)
Estabelecer o Tambor em situações de restrição de capacidade (A2)	<i>Big data</i> e <i>Data analytics</i> (T2)
Estabelecer o Tambor em situações de restrição de mercado (A3)	Soluções em <i>Internet</i> das Coisas (T3)
Estabelecer pulmões estrategicamente posicionados para proteção dos planos de produção e entrega contra as incertezas (A4)	Automação e robótica (T4)
Ajustar dinamicamente o tamanho dos pulmões de tempo de acordo com seu consumo (A5)	Computação e manufatura em nuvem (T5)
Ajustar dinamicamente o tamanho dos pulmões de matérias primas e componentes de acordo com seu consumo (A6)	Sistemas inteligentes de controle da produção, MES, SCADA e ERP (T6)
Ajustar dinamicamente o tamanho dos pulmões de produtos acabados de acordo com seu consumo (A7)	Aprendizagem de máquina e IA (T7)
Liberar material para a fábrica (Corda) de acordo com a restrição do sistema e com a necessária antecipação determinada pelo(s) pulmão(ões) (A8)	Tecnologias de identificação e rastreamento (RFID/QR code/Barcode/GPS) (T8)
Localizar e priorizar ordens de acordo com o consumo do pulmão (A9)	Tecnologias móveis (T9)
Usar o gerenciamento do pulmão como fonte de informação para melhorias ao longo da cadeia de suprimentos (A10)	Sistemas integrados de desenvolvimento de produto e manufatura (T10)
Monitorar a carga (nível de utilização) dos recursos (A11)	
Gerenciar pulmões de capacidade (A12)	
Permitir uso de lotes de transferência diferentes dos lotes de processamento (A13)	
Permitir uso de lotes de processamento variáveis (A14)	
Realizar o <i>full kitting</i> , checando a disponibilidade de todos os insumos antes da liberação de ordem de produção (A15)	
Determinar datas de entrega viáveis e apoiar decisões sobre a aceitação de novos pedidos (A16)	

Fonte: Elaborado pelo autor.

O instrumento de pesquisa foi elaborado com base na hierarquia apresentada no Quadro 7. O questionário foi elaborado usando a ferramenta *Limesurvey* (<https://www.limesurvey.org/pt/>), em inglês, e pode ser visto no Apêndice E. Além de questões iniciais, para identificação do respondente, o questionário foi formado de duas partes. Na primeira, o respondente avaliou os critérios usando a estrutura típica do BWM, com a escolha da melhor e pior atividades e a avaliação, usando a escala 1-9 de Saaty, da Melhor com relação às demais e as demais com relação à Pior. O *Limesurvey* permite o uso de regras condicionais para ocultar e exibir assertivas, o que foi especialmente benéfico para a parte do BWM. No Apêndice E é apresentado um exemplo de questionário, em que o respondente escolheu a primeira atividade como melhor opção (*Best*) e a segunda como (*Worst*), ocultando essas opções nas demais questões. Na segunda parte, o especialista avaliou o suporte potencial de todas as

tecnologias com relação às atividades do TPC/GP, usando escala linguística de 5 pontos, como descrito na seção 4.1.2.

Os critérios para seleção dos especialistas convidados diferiram para acadêmicos e consultores/praticantes. Para os pesquisadores em TOC, o critério estabelecido foi de realizar o convite àqueles especialistas com Doutorado e pelo menos uma publicação sobre TOC em periódico ou Mestres com pelo menos duas publicações. Já para os especialistas com experiências profissionais em TOC, foi verificado, por análise do currículo em site pessoal ou perfil no *LinkedIn*, experiência formal com implantação e gerenciamento de sistemas baseados em TOC. O envio do questionário foi por e-mail e *LinkedIn*. Os e-mails dos especialistas acadêmicos foram coletados nas publicações sobre TOC em periódicos. Já consultores e praticantes foram contactados por e-mail profissional retirado do site da empresa, do portal da TOCICO e de materiais de eventos de TOC, bem como por *LinkedIn*.

## 4.2. ETAPA QUALITATIVA

De forma a ampliar a exploração do tema, optou-se por realizar uma etapa complementar da pesquisa, com a consulta da opinião dos especialistas por meio de coleta de dados qualitativos. Foi elaborado e enviado convite aos especialistas que participaram da primeira etapa, para que eles explorassem as ideias que basearam suas respostas na etapa quantitativa. Outro objetivo desta etapa foi investigar a perspectiva geral que os respondentes têm da interação entre TOC e tecnologias, com foco na Indústria 4.0. O instrumento de pesquisa foi composto por quatro questões abertas, de resposta não compulsória.

As questões requisitavam dos especialistas a análise das respostas agregadas de todos os especialistas, buscando possíveis explicações para as tecnologias que apresentaram maior e menor suporte potencial. Além disso, a investigação buscou investigar como a Indústria 4.0 poderia beneficiar o TPC de maneira geral e, de maneira inversa, como a TOC poderia beneficiar empresas buscando implantar tecnologias da Indústria 4.0. Assim, as quatro questões foram redigidas da seguinte forma:

1. Em sua opinião, como as empresas que buscam implementar tecnologias da Indústria 4.0 podem se beneficiar dos métodos e da filosofia da Teoria das Restrições?

2. Em sua opinião, por que as tecnologias MES, SCADA e ERP, aprendizado de máquina, inteligência artificial, *big data* e *data analytics* foram identificadas como as que mais contribuiriam para as atividades de TPC e GP?
3. Em sua opinião, por que tecnologias móveis (*tablets*, *smartphones*, *smartwatches*), sistemas integrados de engenharia, desenvolvimento e fabricação de produtos e robótica e automação avançada foram identificados como aqueles que menos contribuiriam para as atividades do TPC/GP?
4. Em geral, em sua opinião, como o TPC e o GP podem se beneficiar das tecnologias digitais da Indústria 4.0?

O questionário completo, em inglês, é apresentado no Apêndice F. As respostas para cada questão foram analisadas e os argumentos apresentados pelos especialistas foram agrupados por tema. A discussão sobre as opiniões emitidas é realizada na seção 5.2.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da pesquisa serão apresentados em duas seções principais. A seção 5.1. tratará dos resultados obtidos na abordagem multicritério pelo uso do método integrado BWM-TOPSIS. Já a seção 5.2. resume os resultados da etapa qualitativa.

### 5.1. ETAPA QUANTITATIVA

Métodos de tomada de decisão multicritério, como o AHP e o BWM, são subjetivos, não necessitando de amostras grandes e são úteis para pesquisas com foco em um problema específico com consulta a um grupo limitado de especialistas. Cheng e Li (2002) apontaram que o método de comparação pareada pode ser impraticável para uma pesquisa com um tamanho grande de amostra, pois os entrevistados podem ter uma grande tendência a fornecer respostas arbitrárias, resultando em um grau muito alto de inconsistência. Pesquisas em AHP com um tamanho de amostra pequeno foram conduzidas anteriormente. Por exemplo, Cheng e Li (CHENG; LI, 2002) convidaram nove especialistas em construção para realizar uma pesquisa para testar a comparabilidade de fatores críticos de sucesso para parcerias de construção. Lam e Zhao (1998) também convidaram oito especialistas para uma pesquisa sobre a qualidade do ensino.

Pesquisa de 2017 com envolvimento do criador do BWM, Prof. Rezaei, analisou a resposta completa de 48 especialistas, em um universo de 500 convidados. Eles utilizaram média aritmética para agregar os pesos calculados para cada respondente (BADRI AHMADI; KUSI-SARPONG; REZAEI, 2017). Outra publicação com participação de Rezaei envolveu uma amostra de 41 respondentes (KHEYBARI; KAZEMI; REZAEI, 2019).

Na presente pesquisa, foi enviado convite por e-mail e *LinkedIn* a 631 profissionais, com um lembrete adicional após dois meses. A população consultada foi de especialistas com experiência formal em TOC, acadêmicos com publicações em periódico tratando de TOC, consultores certificados e atuantes na área e profissionais praticantes com experiência em projetos envolvendo TOC. Houve um retorno de 60 respostas completas, o que resulta em uma taxa de resposta de 9,5%. A Tabela 2 mostra o perfil dos respondentes.

Tabela 2 - Perfil dos respondentes do levantamento tipo *survey*

Perfil	n
Acadêmicos	32
Consultores	18
Praticantes	10

Fonte: Elaborada pelo autor.

O instrumento de pesquisa utilizado na etapa quantitativa foi estruturado em duas partes: a primeira é voltada à avaliação pareada das atividades de TPC e GP, a ser analisada pelo método BWM; a segunda aplica o método TOPSIS para avaliação da aplicabilidade das tecnologias da Indústria 4.0 nas atividades de TPC e GP. Dessa forma, apresentação dos resultados e sua discussão também estão divididas em duas seções, conforme a seguir.

### 5.1.1. Importância das atividades dos sistemas TPC e GP – aplicação do método *Best-Worst-Method* (BWM)

Avaliando o nível de consistência das respostas dadas à primeira parte do questionário (comparações entre as atividades de TPC e GP), todas as respostas apresentaram nível de inconsistência inferior a 10%, atendendo ao critério indicado por Saaty (1990). A razão de consistência média, calculada pelo algoritmo de Rezaei (2016), foi de 7,9%. O nível adequado de consistência era esperado, visto que é o principal benefício do método BWM frente a outras abordagens multicritério e indicado para levantamento com um grande grupo de especialistas. Em seguida, as respostas foram analisadas utilizando o modelo BWM (ver equações de (1) a (9)), resultando em um conjunto de pesos para as atividades para cada respondente. A Tabela 3 resume estes resultados, apresentando a média aritmética, coeficiente de variação e classificação para os pesos atribuídos a cada atividade pelos respondentes.

Tabela 3 - Ranking de importância das atividades de TPC/GP, por peso médio

Ranking	Atividade	Peso médio	Coeficiente de variação
1	Identificar o recurso com restrição de capacidade (RRC) (A1)	0,114913	66,56%
2	Liberar material para a fábrica (Corda) de acordo com a restrição do sistema e com a necessária antecipação determinada pelo(s) pulmão(ões) (A8)	0,083871	56,61%
3	Estabelecer pulmões estrategicamente posicionados para proteção dos planos de	0,07431	60,28%

4	produção e entrega contra as incertezas (A4) Estabelecer o Tambor em situações de restrição de capacidade (A2)	0,068648	39,61%
5	Usar o gerenciamento do pulmão como fonte de informação para melhorias ao longo da cadeia de suprimentos (A10)	0,064624	60,03%
6	Determinar datas de entrega viáveis e apoiar decisões sobre a aceitação de novos pedidos (A16)	0,061735	61,16%
7	Estabelecer o Tambor em situações de restrição de mercado (A3)	0,05905	48,47%
8	Realizar o <i>full kitting</i> , checando a disponibilidade de todos os insumos antes da liberação de ordem de produção (A15)	0,058591	54,22%
9	Ajustar dinamicamente o tamanho dos pulmões de tempo de acordo com seu consumo (A5)	0,058553	63,85%
10	Ajustar dinamicamente o tamanho dos pulmões de produtos acabados de acordo com seu consumo (A7)	0,056393	46,73%
11	Ajustar dinamicamente o tamanho dos pulmões de matérias primas e componentes de acordo com seu consumo (A6)	0,0555	37,00%
12	Localizar e priorizar ordens de acordo com o consumo do pulmão (A9)	0,054097	52,64%
13	Monitorar a carga (nível de utilização) dos recursos (A11)	0,051786	38,60%
14	Gerenciar pulmões de capacidade (A12)	0,050349	33,01%
15	Permitir uso de lotes de transferência diferentes dos lotes de processamento (A13)	0,04787	59,01%
16	Permitir uso de lotes de processamento variáveis (A14)	0,039711	55,64%

Fonte: Elaborada pelo autor.

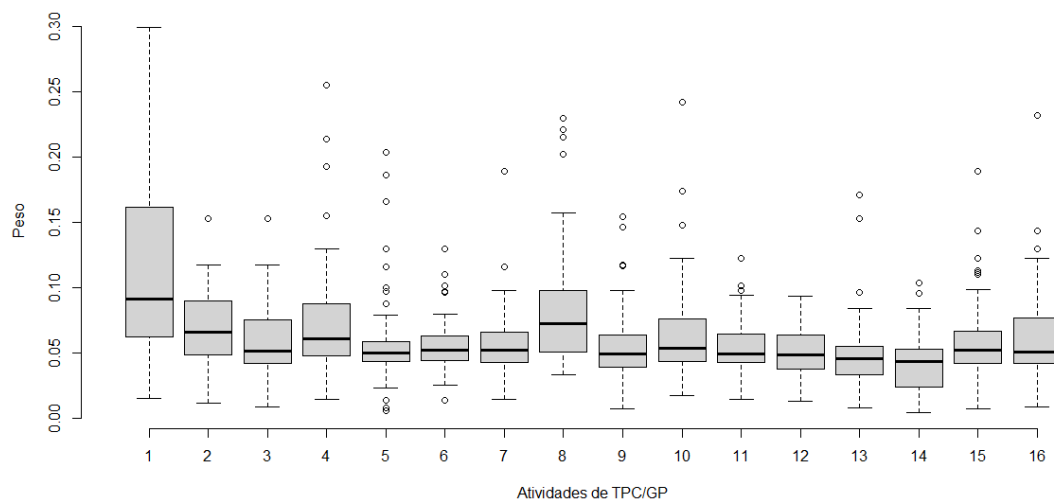
Pela Tabela 3 é possível identificar uma classificação preliminar das atividades e as atividades com maior e menor dispersão. A partir da observação dos resultados da Tabela 3, no entanto, não é possível identificar se as diferenças entre as atividades são estatisticamente significativas, o que indicaria que de fato os respondentes estariam dando maior importância a uma frente às demais. Para isso, foram aplicados testes hipóteses paramétricos ou não paramétricos, dependendo se os pressupostos para cada tipo foram identificados. A análise de variância (ANOVA) é um teste paramétrico que pode ser utilizado para verificar diferença entre os pesos médios atribuídos às 16 atividades (STHLE; WOLD, 1989). Podem-se expressar as hipóteses testadas na ANOVA da seguinte forma:

H0: Não existe diferença entre os pesos médios das atividades de TPC/GP

H1: Há pelo menos um par de atividades de TPC/GP com pesos significativamente diferentes

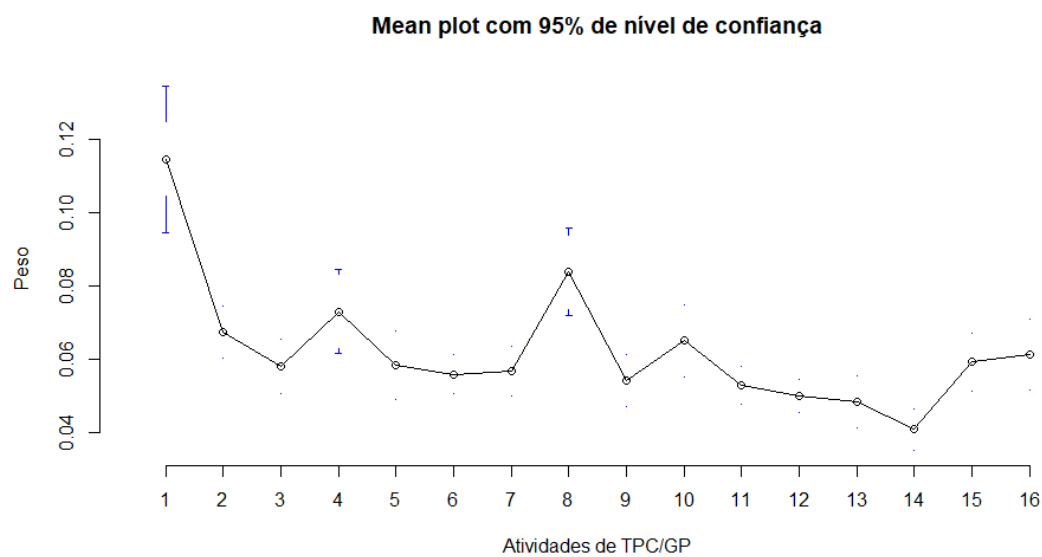
As Figuras 17 e 18 mostram, respectivamente, o *boxplot* e o *mean plot* para os pesos médios por atividade. Observando as Figuras 17 e 18, é razoável supor que há diferenças significativas de *score* médio entre as atividades estudadas. A Figura 18 apresentou apenas algumas atividades com pouca ou nenhuma sobreposição de intervalos de confiança e, portanto, deve-se realizar uma análise detalhada em busca de diferenças significativas.

Figura 18 - *Boxplot* do peso médio para as atividades de TPC/GP



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 19 - *Mean plot* do peso médio para as atividades de TPC/GP com intervalos de confiança de 95%

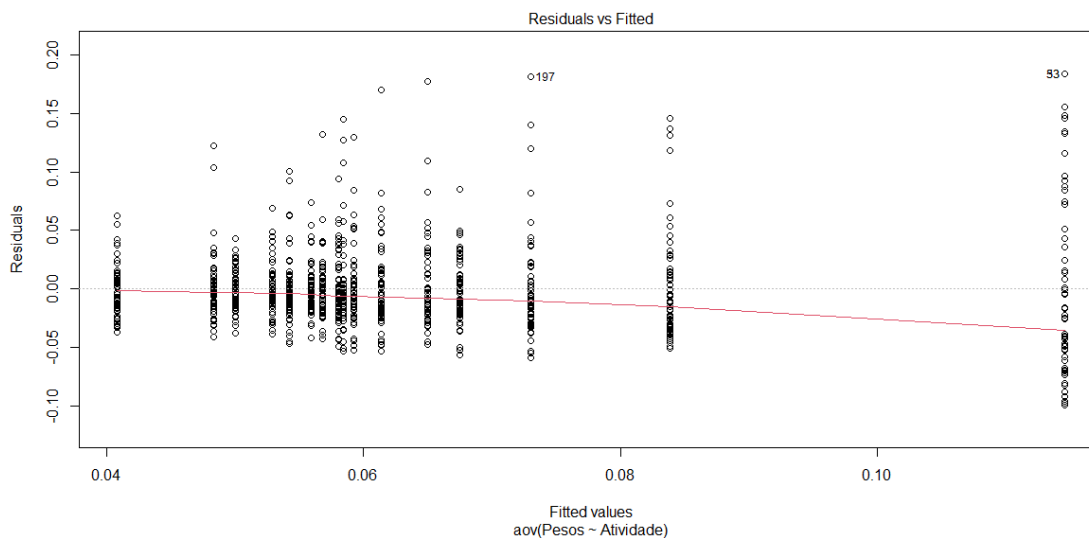


Fonte: Elaborada pelo autor.

Entre os pressupostos da ANOVA estão que as observações devem ser independentes, os grupos comparados apresentem a mesma variância (homoscedasticidade) e os resíduos devem apresentar distribuição normal. Dessa forma, seguiram-se os testes de atendimento a estes pressupostos.

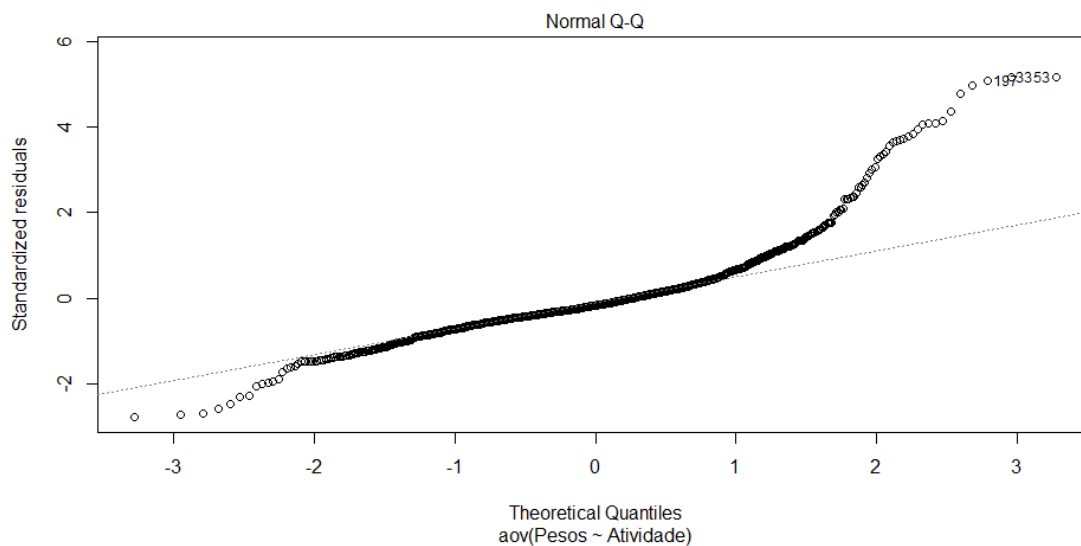
Utilizando o teste de Levene para homogeneidade das variâncias, constatou-se que há evidências de que a variância entre grupos apresenta diferenças estatisticamente significativas ( $F = 10,262$ ,  $p\text{-valor} < 0,01$ ). Pelo gráfico de resíduos contra os valores médios (ajustes ou *fitted values*), também se percebe que a variância tende a aumentar com aumento do valor médio (Figura 19). Do mesmo modo, a normalidade dos resíduos também não foi constatada, como pode ser visto pelo comportamento não-linear no gráfico Q-Q mostrado na Figura 20. Pelo teste de Shapiro-Wilk também ficou comprovada a não-normalidade dos dados ( $W = 0,86067$ ,  $p\text{-valor} < 0,01$ ).

Figura 20 - Gráfico de resíduos x valor médio para checagem da homogeneidade das variâncias dos peso



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 21 - Gráfico Q-Q dos resíduos para os pesos médios para checagem da normalidade



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, optou-se por aplicar uma alternativa não paramétrica ao ANOVA de um fator, o teste de Friedman, para verificar se pelo menos duas atividades apresentam diferenças significativas no peso médio dos respondentes.

Segue-se a análise do poder do teste de Friedman para a amostra coletada. Como forma de analisar o tamanho da amostra foram feitos testes a posteriori usando o programa G\*Power, aplicado a testes ANOVA com medidas repetidas para determinar os pesos dados a cada uma das 16 atividades pesquisadas. Tomando um nível de significância de 5%, ou seja, permitindo 5% de chance de falsamente rejeitar a hipótese nula de que os pesos dos critérios são iguais e um poder do teste de 20%, isto é, existe uma possibilidade de 20% de não se identificar uma diferença que de fato existe, chegou-se a um efeito de tamanho de 0,176, o que é considerado um efeito médio pelas convenções estatísticas (COHEN, 1988) e um tamanho ideal de amostra de 32, o que é quase 50% da amostra efetivamente coletada, mostrando que o tamanho de amostra é adequado para a realização dos testes. Destaca-se que se utilizou para as análises a priori o desvio padrão médio dos 16 critérios avaliados (0,033).

O resultado do teste de Friedman deu positivo para rejeitar  $H_0$  ( $\chi^2 = 115,11$ ,  $p < 0,01$ ), havendo evidência de que existem diferenças significativas entre os pesos médios de pelo menos duas atividades. Portanto, aplicou-se o teste de Conover-Iman para identificar quais pares de atividades apresentaram diferenças estatisticamente

significativas. A Tabela 4 apresenta o p-valores para as comparações múltiplas entre todas as atividades.

A partir dos p-valores é possível determinar quais atividades se diferenciam entre si, definindo grupos ordenados de atividades que apresentem diferenças significativas. Para realizar esse agrupamento, foi utilizado o algoritmo de atribuição de letras chamado *compact letter display* ou CLD, detalhado na seção de método de pesquisa. Os resultados desse agrupamento são mostrados na Tabela 4, considerando nível de confiança de 90%.

Tabela 4 - Resultados do teste de Conover-Iman para comparações pareadas entre pesos médios de atividade

Legenda: Identificar o recurso com restrição de capacidade (RRC) (A1), Estabelecer o Tambor em situações de restrição de capacidade (A2), Estabelecer o Tambor em situações de restrição de mercado (A3), Estabelecer pulmões estrategicamente posicionados para proteção dos planos de produção e entrega contra as incertezas (A4), Ajustar dinamicamente o tamanho dos pulmões de tempo de acordo com seu consumo (A5), Ajustar dinamicamente o tamanho dos pulmões de matérias primas e componentes de acordo com seu consumo (A6), Ajustar dinamicamente o tamanho dos pulmões de produtos acabados de acordo com seu consumo (A7), Liberar material para a fábrica (Corda) de acordo com a restrição do sistema e com a necessária antecipação determinada pelo(s) pulmão(ões) (A8), Localizar e priorizar ordens de acordo com o consumo do pulmão (A9), Usar o gerenciamento do pulmão como fonte de informação para melhorias ao longo da cadeia de suprimentos (A10), Monitorar a carga (nível de utilização) dos recursos (A11), Gerenciar pulmões de capacidade (A12), Permitir uso de lotes de transferência diferentes dos lotes de processamento (A13), Permitir uso de lotes de processamento variáveis (A14), Realizar o *full kitting*, checando a disponibilidade de todos os insumos antes da liberação de ordem de produção (A15), Determinar datas de entrega viáveis e apoiar decisões sobre a aceitação de novos pedidos (A16).

Atividades	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	10	11	12	13	14	15
2	<b>3,62 . 10<sup>-5</sup>***</b>														
3	<b>1,99 . 10<sup>-27</sup>***</b>	<b>1,24 . 10<sup>-5</sup>***</b>													
4	<b>8,08 . 10<sup>-8</sup>***</b>	0,25549	<b>0,001742***</b>												
5	<b>3,36 . 10<sup>-21</sup>***</b>	<b>5,98 . 10<sup>-8</sup>***</b>	0,342653	<b>2,78 . 10<sup>-5</sup>***</b>											
6	<b>4,69 . 10<sup>-18</sup>***</b>	<b>5,28 . 10<sup>-6</sup>***</b>	0,857854	<b>0,00091***</b>	0,429455										
7	<b>1,79 . 10<sup>-15</sup>***</b>	<b>0,00013***</b>	0,61322	<b>0,010433**</b>	0,133162	0,50646									
8	<b>0,077084*</b>	<b>0,026958**</b>	<b>2,63 . 10<sup>-11</sup>***</b>	<b>0,000492***</b>	<b>1,47 . 10<sup>-14</sup>***</b>	<b>7,55 . 10<sup>-12</sup>***</b>	<b>9,08 . 10<sup>-10</sup>***</b>								
9	<b>1,53 . 10<sup>-27</sup>***</b>	<b>4,56 . 10<sup>-12</sup>***</b>	<b>0,013203**</b>	<b>1,2 . 10<sup>-8</sup>***</b>	0,152632	<b>0,021722**</b>	<b>0,002298***</b>	<b>6,48 . 10<sup>-20</sup>***</b>							
10	<b>9,58 . 10<sup>-15</sup>***</b>	<b>0,000311***</b>	0,487846	<b>0,019584**</b>	<b>0,085806*</b>	0,383264	0,831923	<b>3,53 . 10<sup>-9</sup>***</b>	<b>0,001045***</b>						
11	<b>7,09 . 10<sup>-19</sup>***</b>	<b>1,77 . 10<sup>-6</sup>***</b>	0,717628	<b>0,000391***</b>	0,559338	0,831923	0,383264	<b>1,7 . 10<sup>-12</sup>***</b>	<b>0,038651**</b>	0,281665					
12	<b>3,67 . 10<sup>-25</sup>***</b>	<b>2,02 . 10<sup>-10</sup>***</b>	<b>0,057971*</b>	<b>2,6 . 10<sup>-7</sup>***</b>	0,383264	<b>0,085806*</b>	<b>0,013849**</b>	<b>7,44 . 10<sup>-18</sup>***</b>	0,603459	<b>0,007194***</b>	0,133162				
13	<b>7,67 . 10<sup>-38</sup>***</b>	<b>1,5 . 10<sup>-19</sup>***</b>	<b>2,37 . 10<sup>-6</sup>***</b>	<b>3,83 . 10<sup>-15</sup>***</b>	<b>0,000246***</b>	<b>5,73 . 10<sup>-6</sup>***</b>	<b>1,34 . 10<sup>-7</sup>***</b>	<b>6,23 . 10<sup>-29</sup>***</b>	<b>0,035127**</b>	<b>4,3 . 10<sup>-8</sup>***</b>	<b>1,6 . 10<sup>-5</sup>***</b>	<b>0,007194***</b>			
14	<b>2,86 . 10<sup>-46</sup>***</b>	<b>4,47 . 10<sup>-26</sup>***</b>	<b>2,24 . 10<sup>-10</sup>***</b>	<b>5,27 . 10<sup>-21</sup>***</b>	<b>1,09 . 10<sup>-7</sup>***</b>	<b>7,2 . 10<sup>-10</sup>***</b>	<b>5,87 . 10<sup>-12</sup>***</b>	<b>8,88 . 10<sup>-37</sup>***</b>	<b>0,000152***</b>	<b>1,31 . 10<sup>-12</sup>***</b>	<b>2,82 . 10<sup>-9</sup>***</b>	<b>1,34 . 10<sup>-5</sup>***</b>	0,12632		
15	<b>4,06 . 10<sup>-20</sup>***</b>	<b>2,84 . 10<sup>-7</sup>***</b>	0,497128	<b>0,000102***</b>	0,786527	0,603459	0,233507	<b>1,41 . 10<sup>-13</sup>***</b>	<b>0,085806*</b>	0,152632	0,760215	0,248899	<b>7,26 . 10<sup>-5</sup>***</b>	<b>2,15 . 10<sup>-8</sup>***</b>	
16	<b>5,72 . 10<sup>-21</sup>***</b>	<b>8,86 . 10<sup>-8</sup>***</b>	0,382536	<b>3,9 . 10<sup>-5</sup>***</b>	0,933332	0,47862	0,152632	<b>2,65 . 10<sup>-14</sup>***</b>	0,133162	0,102141	0,603459	0,35059	<b>0,000178***</b>	<b>7,37 . 10<sup>-8</sup>***</b>	0,831923

\*p < 0,10; \*\*p < 0,05; \*\*\*p < 0,01

Fonte: Elaborada pelo autor.



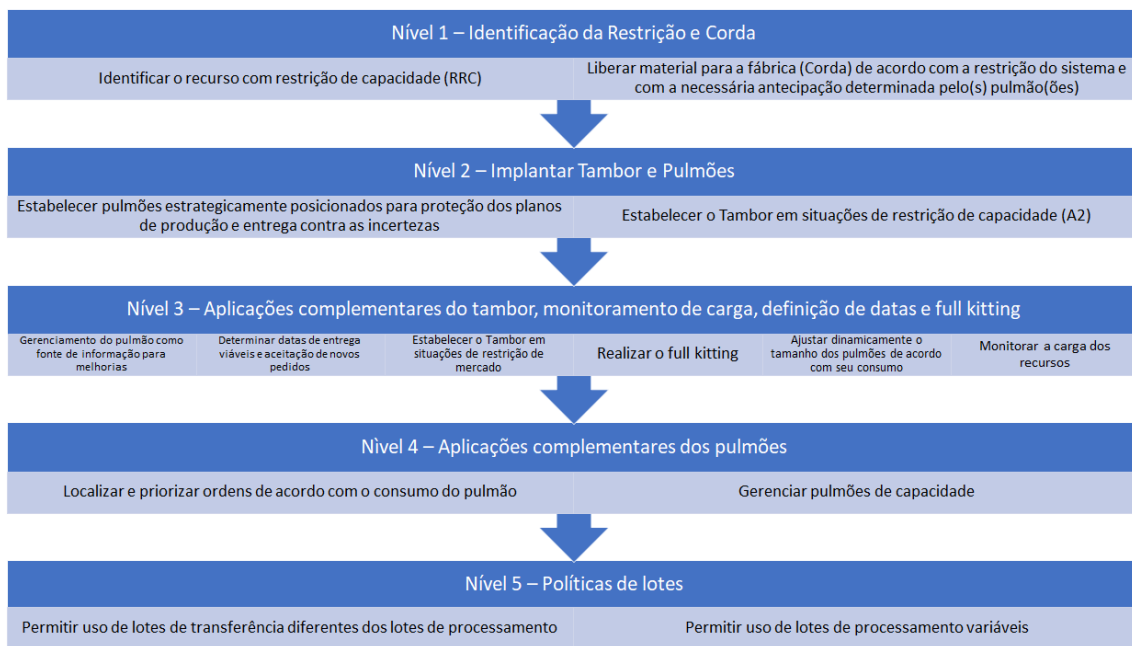
A partir do agrupamento mostrado na Tabela 5, identificam-se cinco conjuntos diferentes de atividades, aqui rotulados como A, B, CD, D e E. Cada conjunto pode ser interpretado como um nível diferente de priorização na implantação de atividades de TPC e GP. A Figura 21 apresenta a hierarquia de atividades usando o agrupamento de pesos médios.

Tabela 5 - Agrupamento das atividades de TPC e GP por nível de priorização, aplicando o algoritmo compact letter display

Atividade	Grupo 90%	Peso médio
Identificar o recurso com restrição de capacidade (RRC) (A1)	A	0,114913
Liberar material para a fábrica (Corda) de acordo com a restrição do sistema e com a necessária antecipação determinada pelo(s) pulmão(ões) (A8)	A	0,083871
Estabelecer pulmões estrategicamente posicionados para proteção dos planos de produção e entrega contra as incertezas (A4)	B	0,07431
Estabelecer o Tambor em situações de restrição de capacidade (A2)	B	0,068648
Usar o gerenciamento do pulmão como fonte de informação para melhorias ao longo da cadeia de suprimentos (A10)	CD	0,064624
Determinar datas de entrega viáveis e apoiar decisões sobre a aceitação de novos pedidos (A16)	CD	0,061735
Estabelecer o Tambor em situações de restrição de mercado (A3)	CD	0,05905
Realizar o <i>full kitting</i> , checando a disponibilidade de todos os insumos antes da liberação de ordem de produção (A15)	CD	0,058591
Ajustar dinamicamente o tamanho dos pulmões de tempo de acordo com seu consumo (A5)	CD	0,058553
Ajustar dinamicamente o tamanho dos pulmões de produtos acabados de acordo com seu consumo (A7)	CD	0,056393
Ajustar dinamicamente o tamanho dos pulmões de matérias primas e componentes de acordo com seu consumo (A6)	CD	0,0555
Localizar e priorizar ordens de acordo com o consumo do pulmão (A9)	D	0,054097
Monitorar a carga (nível de utilização) dos recursos (A11)	CD	0,051786
Gerenciar pulmões de capacidade (A12)	D	0,050349
Permitir uso de lotes de transferência diferentes dos lotes de processamento (A13)	E	0,04787
Permitir uso de lotes de processamento variáveis (A14)	E	0,039711

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 22 - Níveis de priorização das atividades de TPC e GP



Fonte: Elaborada pelo autor.

Cada nível de prática de TPC e GP será discutido em sub-seções específicas, apresentadas a seguir.

- **Nível 1 – Identificação da Restrição e Corda**

O primeiro grupo de priorização se refere às atividades de identificação do RRC e a liberação de materiais para o chão de fábrica, seguindo a programação definida pela Corda. Era esperado que a etapa de identificação da restrição recebesse destaque pelos especialistas, visto que ela é o primeiro passo do processo de focalização proposto por Goldratt, base para o desenvolvimento da TOC (COX, 2019). A identificação da restrição é a etapa subsequente à definição da meta do sistema e das medidas de ganho que refletem a meta e é executada a partir de uma visão ampla do sistema (DA SILVA STEFANO et al., 2017). A identificação das poucas restrições que governam o comportamento e o desempenho do sistema reduz radicalmente as variáveis que devem ser controladas. Além disso, a identificação de restrições permite um alinhamento claro das medidas de desempenho local com o objetivo geral de ganhar mais dinheiro agora e no futuro (BLACKSTONE; GARDINER; GARDINER, 1997), sendo um aspecto chave para melhorar a capacidade e a estabilidade da produção (URBAN; ROGOWSKA, 2020).

Necessita-se de uma orientação clara sobre como identificar uma restrição. Qualquer mecanismo de controle depende de a restrição ser conhecida, o que em circunstâncias de gargalos dinâmicos ou interativos pode ser particularmente desafiador (CHEN; WANG; DU, 2020; SAIF et al., 2019; THÜRER; STEVENSON, 2018). A relevância dessa etapa é indicada pelo desenvolvimento recente de métodos, como a *Flow Constraint Analysis* e a Análise de Utilização Efetiva, baseada no sistema CONWIP (SIMS; WAN, 2017). Ainda, o estudo de Urban (2019) mostrou que identificar um gargalo no sistema de produção não é óbvio, pois, diferentes métodos de identificação mostraram vários gargalos diferentes. Portanto, esta é uma etapa desafiadora do TPC, que deve ter orientações claras e receber suporte adequado. Soluções práticas que apoiem a identificação de restrições ainda são requeridas (URBAN, 2019).

É interessante observar o destaque dado pelos especialistas à atividade de estabelecimento da Corda, superando Tambor e Pulmão em grau de importância. Puche et al. (2016, p. 424) recentemente indicaram a Corda como “o artefato chave para o gerenciamento do fluxo”, pelo seu papel de integração no sistema. Goldratt discute a relevância do processo de liberação de materiais em seu artigo “Standing on the Shoulders of Giants” (GOLDRATT, 2009), o que pode ajudar a entender esse resultado. A aplicação do TPC em sistemas baseados no tempo é justificada pela noção intuitiva de se evitar superprodução por meio do impedimento de se liberar trabalho para o chão de fábrica antes do momento estritamente necessário. A decisão da liberação de ordens determina o tamanho das filas e, conseqüentemente, os tempos totais de produção, que por sua vez interagem com o tempo para liberação de outras ordens. Ademais, a Corda é um importante mecanismo de comunicação e sincronização no sistema, por transferir informações dos pulmões e de mudanças eventuais na programação do Tambor para os recursos não restritivos, liberação de materiais e compras (NAOR; BERNARDES; COMAN, 2013; SCHRAGENHEIM; COX; RONEN, 1994). O papel de limitação do inventário ao nível mínimo necessário para manter o desempenho da restrição da capacidade em seu máximo e de *feedback* aos demais processos pode explicar a importância superior atribuída pela amostra.

Deve-se ter em mente que a Corda é calculada com base na programação do recurso restritivo e no tamanho do pulmão e, portanto, bastante dependente do Tambor e Pulmão. Mesmo assim, a Corda foi colocada em um patamar acima dessas atividades. A propósito, a maioria das atividades de PCP propostas pela TOC se influenciam

mutuamente, o que não impede que se analisem suas prioridades. Por fim, deve-se ter em conta o desafio de implantar a Corda adequadamente. Garantir que a Corda será seguida, não ocorrendo liberação adiantada de material, é essencial (SCHRAGENHEIM; COX; RONEN, 1994). Nas primeiras implantações, houve a necessidade de apoio de sistemas MRP para os cálculos de liberação de material, levando-se em conta apenas os *lead times* para a restrição (GUPTA; BOYD, 2008; SIRIKRAI; YENRADEE, 2006). Lembrando que uma segunda Corda pode ser aplicada do mercado até os recursos restritivos, criando uma linha de comunicação entre manufatura e vendas/*Marketing*. Essa integração de todo o sistema possibilitado pela Corda pode ser uma razão para a priorização atribuída pelos especialistas (BLACKSTONE, 2001; THÜRER et al., 2017b; WATSON; POLITO, 2003). Ainda há uma terceira Corda, aplicada no TPC-S, que liga diretamente a demanda à liberação de trabalho, com suavização pela Carga Planejada, não havendo necessidade de programação de nenhum recurso (CHAKRAVORTY; HALES, 2016; SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2001; SOUZA; BAPTISTA, 2010).

- Nível 2 – Implantação de Tambor e Pulmões

O segundo grupo reúne o estabelecimento de pulmões e o estabelecimento do Tambor. Estas estão entre ações mais conhecidas e, conjuntamente com a Corda, formam o núcleo do TPC (SCHRAGENHEIM; RONEN, 1990). Sendo assim, era esperado que estas atividades se sobressaíssem. Destaca-se que o Tambor, apesar de ser bem avaliado, não aparece com o mesmo nível de importância da identificação do gargalo. Ambos se relacionam diretamente ao recurso restritivo, e os especialistas poderiam tender a analisá-los de maneira conjunta, atribuindo pesos semelhantes. Inclusive, alguns trabalhos citam o Tambor como sendo a própria restrição e não a sua programação ou exploração (BOLLAPRAGADA; SADEH, 2004; ONWUBOLU; MUTINGI, 2001; PATTI; WATSON, 2010; SIHA, 1999). Essa indefinição poderia aproximar as atividades na análise dos respondentes. Porém, é natural a priorização diferente visto que o Tambor inclui uma programação detalhada da restrição (BETTERTON; COX, 2009), necessitando que esta já tenha sido propriamente identificada.

- Nível 3 - Outros usos de pulmão e tambor, monitoramento de carga e *full kitting*

O uso dos pulmões como fontes de informação para melhorias teve destaque nesse nível. A observação do consumo dos pulmões mostra a localização do ponto em que as ordens estão atrasando, sendo foco de atenção gerencial para melhoria do fluxo, o que também envolve a observação do consumo dos pulmões (COX et al., 2012). O GP pode ser usado para concentrar esforços de melhoria nos processos que têm o maior impacto negativo no desempenho do cronograma, simplificando o gerenciamento de esforços de melhoria contínua (WATSON; BLACKSTONE; GARDINER, 2007). Além desse benefício, o GP permite que os gerentes avaliem o impacto das mudanças feitas no sistema à medida que são implementadas (WATSON; POLITO, 2003). Curiosamente, essa aplicação foi ligeiramente mais valorizada (também empatou com as atividades do grupo C, além do D) que a atividade de priorização de ordens, que também envolve a análise do consumo dos pulmões e ficou no nível seguinte.

Além disso, um resultado relevante foi de que o Tambor em condições de restrição de capacidade foi posicionado em um grupo superior (Nível 2) se comparado à mesma atividade quando a restrição está no mercado (Nível 3). O TPC tradicional foi desenvolvido considerando recursos gargalos, o que pode ter influenciado os respondentes em dar maior importância em programar o RRC a agendar as entregas de forma a maximizar o ganho. Talvez este seja um indicativo da baixa adesão ou conhecimento ao TPC-S da comunidade de TOC a essa abordagem mais recente.

Outra hipótese é a de que a programação dos recursos restritivos é vista como de mais difícil estabelecimento, necessitando algumas vezes de *softwares* especialistas para isso. A adoção de tecnologias digitais para programação de recursos pode ser útil nesse processo, o que será explorado na seção 5.1.2. Para manter o foco na restrição de mercado e evitar o reaparecimento de gargalos operacionais, é fundamental saber como sustentar o aumento das vendas e sincronizar vendas e operações de forma que a entrada de pedidos evite não apenas o colapso, mas também permita um crescimento contínuo (IKEZIRI et al., 2019). Daí decorre o desafio de implantar o TPC-S apropriadamente. Lee et al. (2010) apontam que algumas características da empresa podem dificultar a implementação do TPC-S, como o RRC estar posicionado nos extremos do sistema, a existência de múltiplos RRCs ou restrições interativas e a existência de mudanças de datas de entrega decorrentes da inserção de novas ordens, muitas vezes urgentes. Portanto, a presença de alguma dessas características pode levar a um retorno ao TPC tradicional (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000).

Também, por ser menos conhecido e citado das publicações, era esperado que o *full kitting* aparecesse entre os últimos grupos de atividades, porém esta atividade apareceu em posição intermediária. O processo de *kitting* não é uma inovação da TOC, mas sua versão é muito mais rigorosa e foi aplicada extensivamente na CCPM, para preparação dos recursos, reduzindo o impacto da incerteza e permitindo uma execução mais suave dos projetos (APAOLAZA; LIZARRALDE, 2020; APAOLAZA; LIZARRALDE; OYARBIDE-ZUBILLAGA, 2020). Outra possível explicação para esse destaque dado ao *full kitting* é o seu benefício potencial significativo a sistemas de produção com a presença de submontagens e compartilhamento de componentes, como os do tipo A<sup>1</sup> e T<sup>2</sup>.

Ademais, todas as atividades de ajuste dinâmico dos pulmões apresentaram mesmo nível de importância, apresentando peso médio significativamente menor do que o estabelecimento dos pulmões e maior do que seu uso para localização e priorização de ordens e melhoria contínua. Este é mais um indício de que os participantes levaram em conta o contexto do TPC clássico ao avaliar as atividades, já que o ajuste dinâmico tem sido mais explorado no contexto do MTA (CIECHANSKA; SZWED, 2020). A decisão sobre quanto o *buffer* irá aumentar ou diminuir é baseada em uma avaliação da combinação de oferta e demanda. Interessante que o ajuste dinâmico, assim como a priorização de ordens também é feito a partir do consumo dos pulmões (SIMATUPANG; WRIGHT; SRIDHARAN, 2004), gerando expectativa de que essas atividades recebessem importância equiparada.

Por fim, interessante notar a posição relativamente superior da atividade de determinação de datas de entrega viáveis e apoio a decisões sobre a aceitação de novos pedidos. Monitorar as cargas de recursos e o *status* das ordens é essencial para o agendamento e reprogramação das ordens em datas viáveis (LIZARRALDE; APAOLAZA; MEDIAVILLA, 2020). Talvez os respondentes reconheçam a complexidade dessa atividade, mesmo em situação de restrição de mercado. Ainda, observa-se que essa atividade tem uma relação próxima com a gestão da capacidade,

---

<sup>1</sup> Sistema A - Um ambiente de produção que começa com um número relativamente grande de matérias-primas que passam por uma sucessão de operações convergentes que criam subconjuntos, conjuntos e, finalmente, um número relativamente pequeno de itens finais (COX et al., 2012).

<sup>2</sup> Sistema T - Um ambiente de produção caracterizado por um fluxo inicial em linha reta seguido por pontos de montagem finais divergentes. Em uma planta em T, o principal problema é o “roubo” de peças/subconjuntos comuns entre os produtos (COX et al., 2012).

que define se há proteção suficiente nos recursos para garantir a entrega dos pedidos, mas se apresentou ligeiramente superior em importância.

- Nível 4 - Aplicações complementares dos pulmões

O grupo de atividades que aparece na penúltima posição inclui a localização e priorização das ordens por meio do consumo do pulmão e o gerenciamento de pulmões de capacidade. A baixa importância dada aos pulmões de capacidade provavelmente se deve também a ser pouco conhecida e, portanto, disseminada. Esses pulmões foram incorporados ao TPC por Schragenheim (2010), para a situação específica da gestão da capacidade de sistemas MTA. Talvez grande parte da comunidade em TOC ainda não tenha internalizado totalmente as inovações do TPC-S e siga mais estritamente o preconizado na abordagem original. Ainda, pode ter havido alguma confusão com o pulmão de capacidade aplicado na gestão de ambientes multiprojetos, como parte da CCPM (COX et al., 2012; IRANMANESH; MANSOURIAN; KOUCHAKI, 2016).

É difícil conceber que a gestão da capacidade, essencial em ambientes MTA, esteja sendo negligenciada pela comunidade. Uma razão potencial para a baixa avaliação dessa atividade é a possibilidade de se combinar o TPC com outras ferramentas de planejamento da capacidade, como, por exemplo, o RCCP ou RRP. A literatura cita a possibilidade de se utilizar o RCCP para identificar o recurso gargalo (MILTENBURG, 1997; STEELE et al., 2005). Sendo assim, não seria absolutamente necessário aplicar o pulmão de capacidade para prever gargalos potenciais ou futuros. De qualquer forma, explorar a adoção de ações voltadas à gestão de capacidade em sistemas baseados no TPC merece estudos futuros.

Um resultado inusitado foi a baixa avaliação do uso dos pulmões para priorizar ordens no chão de fábrica. Talvez um dos principais usos dos pulmões, além de prover segurança à restrição e limitar o estoque em processo, seja auxiliar na programação de curto prazo, apressando ordens urgentes, inclusive para atender demanda inesperada. O esquema de cores dos pulmões é o equivalente ao encontrado nos quadros Kanban, auxiliando o sistema a focar em produzir aquilo que está sendo mais consumido no momento, dando dinâmica ao processo (WATSON; PATTI, 2008). Talvez os respondentes avaliem que regras simples de programação, como FIFO (*First In First Out*), SPT (*Shortest Process Time*) e EDD (*Earliest Due Date*) sejam suficientemente boas, suprimindo este uso dos pulmões. Ainda, a baixa avaliação pode estar relacionada às

limitações da técnica. A priorização pelo *status* do pulmão não considera dependência nos tempos de *setup*, o que pode aumentar o tempo médio de fluxo e atrasar a reposição do estoque que foi consumido pela demanda (CASTRO; GODINHO-FILHO; TAVARES-NETO, 2020).

- Nível 5 – Políticas de lotes

Indo para o outro extremo dos agrupamentos, as atividades “permitir uso de lotes de transferência diferentes dos lotes de processamento” e “permitir uso de lotes de processamento variáveis” receberam os menores pesos médios, apresentando diferenças estatisticamente significativas com as demais. Desde quando Goldratt et al. (1986) apresentaram estas atividades como regras do OPT, apareceram evidências robustas de que dividir lotes de processamento para transferência quase sempre melhora os critérios de desempenho operacionais (RUSSELL, FRY, 1997, STEELE, PHILIPOOM, *et al.*, 2005; GOLMOHAMMADI, 2015). Apesar de serem medidas voltadas a aumentar a velocidade do fluxo de recursos restritos para facilitar a operação de recursos não restritivos (HUANG, 2002), essas atividades apresentaram o menor nível de priorização.

Algumas hipóteses para essa baixa avaliação podem ser elencadas: i) essas ações são consequências de se trabalhar com um sistema em que os recursos não-restritivos não ficam sobrecarregados e nem são formalmente programados, podendo trabalhar naturalmente com lotes menores (mais *setups*, mais manuseio), melhorando o fluxo total; ii) os respondentes não ligam essas ações de política de lotes à TOC, visto que também aparecem em outros sistemas puxados, voltadas ao fluxo contínuo, como o *lean* por exemplo (uso de Kanbans, células de manufatura), por exemplo (LEA; MIN, 2003); ou iii) simplesmente são atividades menos citadas nos trabalhos acadêmicos e, sendo menos conhecidas, foram subestimadas na avaliação dos respondentes.

Sobre a primeira razão, o TPC dificilmente não precisa necessariamente lidar com o problema de tamanho de lotes, especialmente porque na restrição o tamanho de lote é fortemente limitado (falta de capacidade), enquanto em não restrições, o tamanho de lote é menos rigoroso, se o número de *setups* for controlado (VANDAELE; DE BOECK, 2003). Ainda, lidar com tamanhos de lote não é trivial. O lote de processamento apresenta uma relação convexa com o *lead time*. Como consequência, existe um lote de processo ideal, que minimiza o *lead time*. Se a administração decidir



se desviar desse lote de processo ideal, os efeitos podem ser substanciais, especialmente sob circunstâncias de altas utilizações e variabilidade. Além disso, essa relação convexa não é simétrica, o que significa que um desvio acima e abaixo do tamanho ideal não tem o mesmo impacto no *lead time*. O tamanho do lote de transferência também depende dos tempos relativos de processamento e *setup* dos recursos (RUSSELL; FRY, 1997; VANDAELE; DE BOECK, 2003). Dessa forma, os efeitos do *lot splitting* tanto para processo quanto transferência nem sempre são substanciais, principalmente se não for acompanhado de uma redução no lote de processamento (RUBEN; MAHMOODI, 1998). Godinho Filho e Barco (2021) demonstraram que a redução do lote de produção no gargalo, aliada à redução de lotes de transferência em toda a linha, reduz significativamente o *lead time* em ambientes desbalanceados. Porém, o tamanho do lote de transferência tem pouca influência no *lead time*, tanto em ambientes balanceados quanto desbalanceados, quando se opera com tamanho de lote de produção não-ótimo. Estas ressalvas podem ter contribuído para o baixo peso médio por parte dos especialistas.

Como síntese dos resultados da seção, o Quadro 8 destaca os principais resultados esperados, bem como as referências que corroboram com o que foi evidenciado na pesquisa quantitativa. Já o Quadro 9 apresenta resultados complementares à literatura, além de potenciais explicações para as observações empíricas e motivações para pesquisas futuras decorrentes.

Quadro 8 - Resultados previstos na literatura com relação à avaliação das atividades do TPC/GP

<b>Resultados esperados</b>	<b>Referências</b>
A atividade mais importante para o TPC é a identificação da restrição. A literatura aponta este processo como desafiador, dada a variedade de métodos existentes e condições de gargalos dinâmicos ou interativos.	(BLACKSTONE; GARDINER; GARDINER, 1997; COX, 2019; THÜRER et al., 2021)
Os especialistas tenderam a dar maior peso a atividades vistas como mais desafiadoras, como a identificação da restrição e a programação de recursos físicos.	(SAIF et al., 2019; SIMS; WAN, 2017; URBAN; ROGOWSKA, 2020)
O núcleo da abordagem, o estabelecimento de Tambor, Pulmões e Corda, recebeu os maiores pesos.	(SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000; SCHRAGENHEIM; RONEN, 1990)
O Tambor para o TPC tradicional recebeu peso maior do que no que para o TPC-S. Maior dificuldade de se programar detalhadamente (e por capacidade finita) recursos físicos é uma possível explicação.	(IKEZIRI et al., 2019; LEE; KIM; PARK, 2010; SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000)
Atividades de ajuste dinâmico do pulmão tiveram pesos estatisticamente semelhantes, não diferindo se o pulmão é de produto acabado, componentes e matérias-primas ou de tempo.	(BACELAR-SILVA; COX; RODRIGUES, 2020; HADAS; CYPLIK; FERTSCH, 2009; MIRZAEI; MABIN, 2018)

Baixa avaliação das políticas de lotes dinâmicos propostas pelas TOC.	(LEA; MIN, 2003; RUBEN; MAHMOODI, 1998; VANDAELE; DE BOECK, 2003)
---	---

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 9 - Resultados inesperados sobre a avaliação das atividades do TPC/GP e possíveis explicações

Resultados surpreendentes	Possíveis explicações e eventuais recomendações de pesquisas futuras
Corda aparece em um nível de priorização acima de Tambor e Pulmão. A literatura não aponta uma relação hierárquica entre os elementos.	Importância atribuída pelos especialistas ao controle do nível de inventário para manutenção do desempenho da restrição. A Corda nem sempre é seguida, o que pode ser preocupante.
O uso dos pulmões para priorização de ações de melhoria apresentou peso significativamente maior do que o uso mais comum para priorizar ordens pelo <i>status</i> .	Uso de regras convencionais para sequenciamento (FIFO, EDD, SPT, razão crítica). Pesquisa futura: Avaliar a aplicação real dos pulmões na orientação do processo de melhoria contínua
No geral, as atividades do TPC-S receberam menor peso do que as do TPC tradicional.	Apesar de mais contemporâneo, o TPC-S é talvez ainda menos conhecido, ou menos aplicado que sua forma clássica. Sensação de maior controle ao escolher um gargalo de produção como restrição estratégica. Dificuldade maior de se programar recursos. Pesquisa futura: Investigar em campo o nível atual de aplicação do TPC-S.
<i>Full kitting</i> , apesar de ser pouco citada e explorada na literatura, recebeu peso intermediário comparada às demais atividades.	Ainda que pouco conhecida no contexto do TPC, é aplicada extensivamente na CCPM.
O ajuste dinâmico apresentou importância menor do que o estabelecimento inicial do pulmão e maior do que o uso do pulmão para priorizar melhorias, apesar de todos estarem baseados no consumo do pulmão.	Pode ter sido levado em consideração o contexto do TPC clássico. Necessidade de <i>softwares</i> especialistas para se fazerem ajustes dinâmicos dos pulmões, assim como cálculo de <i>status</i> para fins de priorização de ordens de produção.
Baixa avaliação de atividades ligadas à gestão da capacidade e de priorização de ordens no chão de fábrica.	Uso de outras ferramentas de planejamento, como o RCCP.

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.1.2. Suporte das tecnologias da Indústria 4.0 às atividades dos sistemas TPC e GP – aplicação do método TOPSIS

As avaliações feitas pelos especialistas para as tecnologias da Indústria 4.0 receberam tratamento análogo às atividades de TPC/GP. A princípio, a escala linguística aplicada no questionário foi transformada em escala *likert* de cinco pontos (1 = Muito baixo; 2 = Baixo; 3 = Médio; 4 = Alto; 5 = Muito alto). Dessa forma, cada

resposta resultou em uma matriz de decisão 10 x 16, considerando as linhas como as alternativas e as colunas como os critérios. Para cada respondente, foi gerado um vetor de *scores* por meio do algoritmo TOPSIS (ver equações de (10) a (16)), usando como pesos dos critérios (atividades) o vetor de pesos gerados por BWM. Lembrando que cada respondente tem um conjunto de pesos específico, pois valoriza atividades específicas. A Tabela 6 mostra as tecnologias estudadas ordenadas por *score* médio dos 60 respondentes.

Tabela 6 - Ranking pelo *score* médio das tecnologias da Indústria 4.0 relativo ao nível de suporte potencial às atividades de PCP da TOC

Ranking	Tecnologia	<i>Score</i> médio	Coefficiente de variação
1	Sistemas inteligentes de controle da produção, MES, SCADA e ERP (T6)	0,635554959	46,16%
2	Aprendizagem de máquina e inteligência artificial (T7)	0,602514399	45,28%
3	Soluções em <i>Big data</i> e Análise de Dados (T2)	0,598558085	41,30%
4	RFID, QR code, código de barras e GPS para identificação e rastreamento (T8)	0,547678872	45,07%
5	Simulação, realidade virtual, realidade aumentada e <i>wearables</i> (T1)	0,532074362	46,62%
6	Soluções em <i>Internet</i> das Coisas (T3)	0,504354303	43,11%
7	Computação e manufatura em nuvem (T5)	0,445875945	60,46%
8	Dispositivos móveis, como tablets, <i>smartphones</i> e <i>smartwatches</i> (T9)	0,416648328	56,72%
9	Sistemas integrados de engenharia para desenvolvimento e fabricação de produtos (T10)	0,392910791	75,79%
10	Robótica e Automação Avançada (T4)	0,384039144	66,71%

Fonte: Elaborada pelo autor.

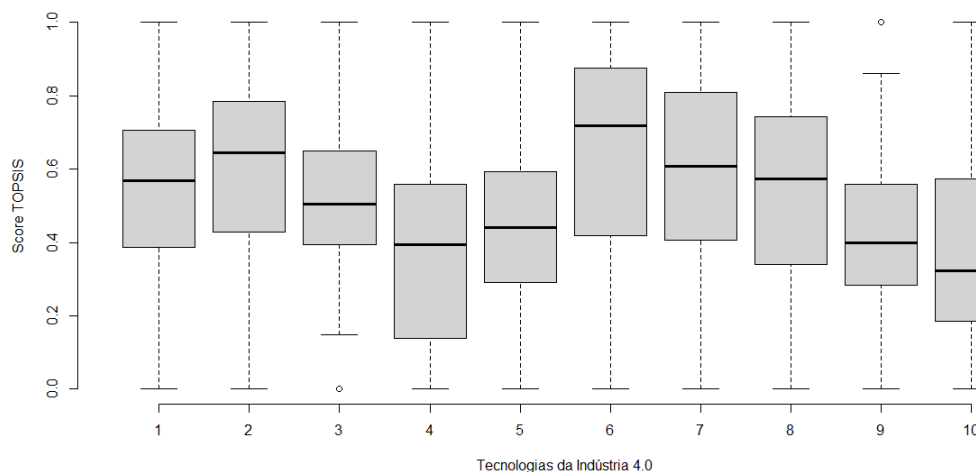
As atividades com *score* médio mais alto são mais promissoras para serem alvo de investimento, visto que apresentam potencial de suporte para as atividades mais valorizadas pelos respondentes. Além disso, o coeficiente de variação mostra que as tecnologias melhor posicionadas também foram as com menor dispersão. Como essas atividades podem variar bastante entre os respondentes, indica-se que essas tecnologias têm maior abrangência de aplicação, adaptando-se a padrões de implantação de TPC/GP distintos. Os *scores* médios mostrados na Tabela 6 também precisam passar por análise de variância e testes de hipóteses, de forma a verificar se há de fato diferenças significativas que justifiquem o ranqueamento. Para este caso, propõem-se as seguintes hipóteses para teste:

H0: Não existe diferença entre os *scores* médios das tecnologias da Indústria 4.0

H1: Há pelo menos um par de tecnologias da Indústria 4.0 com *scores* significativamente diferentes

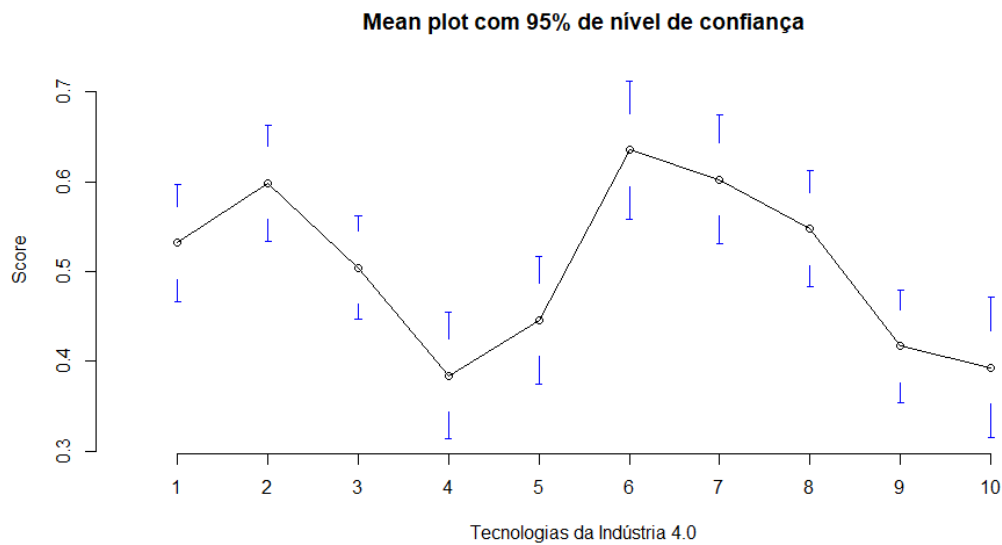
As Figuras 22 e 23 mostram, respectivamente, o *boxplot* e o *mean plot* para os *scores* por tecnologia. Observando as Figuras 22 e 23, é razoável afirmar que há diferenças significativas de *score* médio entre os grupos tecnológicos estudados. A Figura 23 indica, inclusive, que algumas tecnologias não apresentam nenhuma sobreposição de intervalos de confiança, o que é forte indício de desempate. De qualquer forma, os testes estatísticos adequados também foram aplicados, de forma a identificar essas diferenças.

Figura 23 - *Boxplot* da variável “*score*” para as tecnologias da Indústria 4.0



Fonte: Elaborada pelo autor.

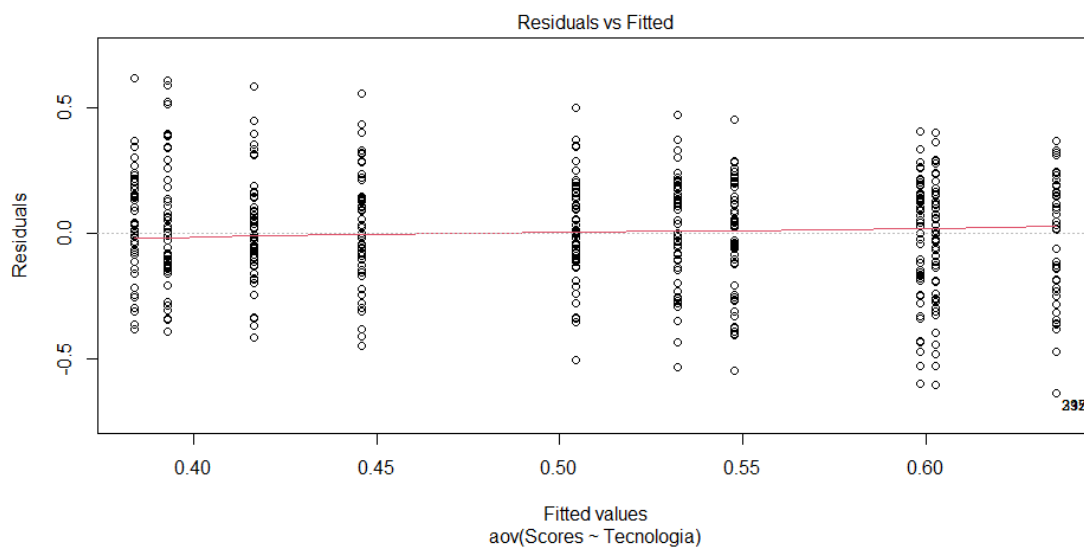
Figura 24 - Mean plot da variável “score” com intervalos de confiança de 95%



Fonte: Elaborada pelo autor.

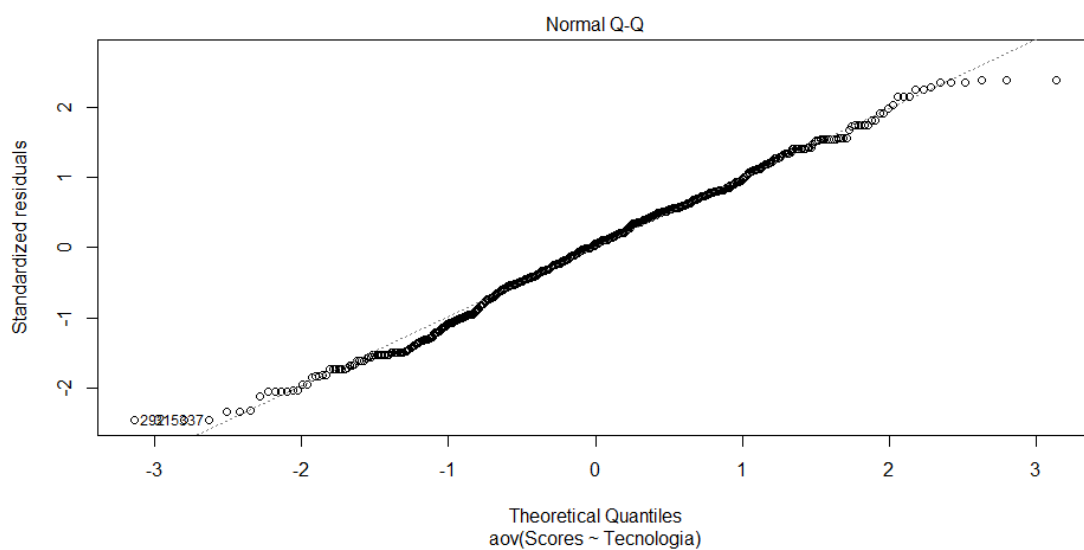
A fim de escolher o teste de hipóteses correto para o conjunto de dados de *score*, devem-se verificar os pressupostos do ANOVA de um fator, da mesma forma que foi feito para os pesos anteriormente. Utilizando o teste de Levene, há indicação de que os *scores* apresentam homocedasticidade ( $F = 1,2921$ ,  $p\text{-valor} = 0,2379$ ). Pelo gráfico de resíduos contra os valores médios (ajustes ou *fitted values*), percebe-se que a distribuição dos resíduos é homogênea para as 10 tecnologias, não havendo tendência bem definida (Figura 24). Já a normalidade dos resíduos não pôde ser verificada. Pelo gráfico Q-Q, mostrado na Figura 25, verifica-se que os pontos extremos se distanciam da reta  $y=x$ , indicando a não normalidade. Pelo teste de Shapiro-Wilk também ficou comprovada a não-normalidade dos dados ( $W = 0,99307$ ,  $p\text{-valor} = 0,008831$ ). Portanto, testes não paramétricos também são indicados neste caso.

Figura 25 - Gráfico de resíduos x valor médio para checagem da homogeneidade das variâncias dos *scores*



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 26 - Gráfico Q-Q dos resíduos para os *scores* médios para checagem da normalidade



Fonte: Elaborada pelo autor.

Então, também foi aplicado o teste de Friedman, para verificar se pelo menos duas tecnologias apresentam diferenças significativas no *score* médio. O teste também deu resultado positivo para rejeitar  $H_0$  ( $\chi^2 = 66.727$ ,  $p < 0,01$ ), havendo evidência de que existem diferenças significativas entre os *scores* de pelo menos dois grupos tecnológicos. Para identificar quais atividades apresentaram diferenças, mais uma vez

foi utilizado o teste de Conover-Iman (CONOVER; IMAN, 1979), com maior potencial de comparação entre os tratamentos estudados. Os resultados de p-valor para os testes de diferença entre médias são mostrados na Tabela 7, com destaque em negrito para as comparações que apresentaram diferença significativa.

Tabela 7 - Resultados do teste de Conover-Iman para comparações pareadas entre *scores* médios de tecnologia da Indústria 4.0

Tecnologias	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
A2	<b>0,009886***</b>								
A3	<b>0,020645**</b>	<b>9,39 . 10<sup>-7***</sup></b>							
A4	<b>1,07 . 10<sup>-15***</sup></b>	<b>3,6 . 10<sup>-25***</sup></b>	<b>5,88 . 10<sup>-9***</sup></b>						
A5	<b>3,57 . 10<sup>-6***</sup></b>	<b>8,17 . 10<sup>-13***</sup></b>	<b>0,020645**</b>	<b>0,000423***</b>					
A6	<b>3 . 10<sup>-5***</sup></b>	0,113488	<b>1,1 . 10<sup>-10***</sup></b>	<b>2,41 . 10<sup>-31***</sup></b>	<b>6,54 . 10<sup>-18***</sup></b>				
A7	<b>0,000965***</b>	0,481592	<b>2,21 . 10<sup>-8***</sup></b>	<b>8,17 . 10<sup>-28***</sup></b>	<b>5,89 . 10<sup>-15***</sup></b>	0,382458			
A8	0,467389	<b>0,000861***</b>	0,113488	<b>2,17 . 10<sup>-13***</sup></b>	<b>9,22 . 10<sup>-5***</sup></b>	<b>9,39 . 10<sup>-7***</sup></b>	<b>5,77 . 10<sup>-5***</sup></b>		
A9	<b>2,5 . 10<sup>-11***</sup></b>	<b>1,06 . 10<sup>-19***</sup></b>	<b>1,06 . 10<sup>-5***</sup></b>	0,152155	<b>0,037546**</b>	<b>9,78 . 10<sup>-26***</sup></b>	<b>2,67 . 10<sup>-22***</sup></b>	<b>2,41 . 10<sup>-9***</sup></b>	
A10	<b>2,54 . 10<sup>-16</sup></b>	<b>8,14 . 10<sup>-26***</sup></b>	<b>2 . 10<sup>-9***</sup></b>	0,84122	<b>0,000201***</b>	<b>6,76 . 10<sup>-32***</sup></b>	<b>1,65 . 10<sup>-28***</sup></b>	<b>5,61 . 10<sup>-14***</sup></b>	0,109962

\*p < 0,10; \*\*p < 0,05; \*\*\*p < 0,01

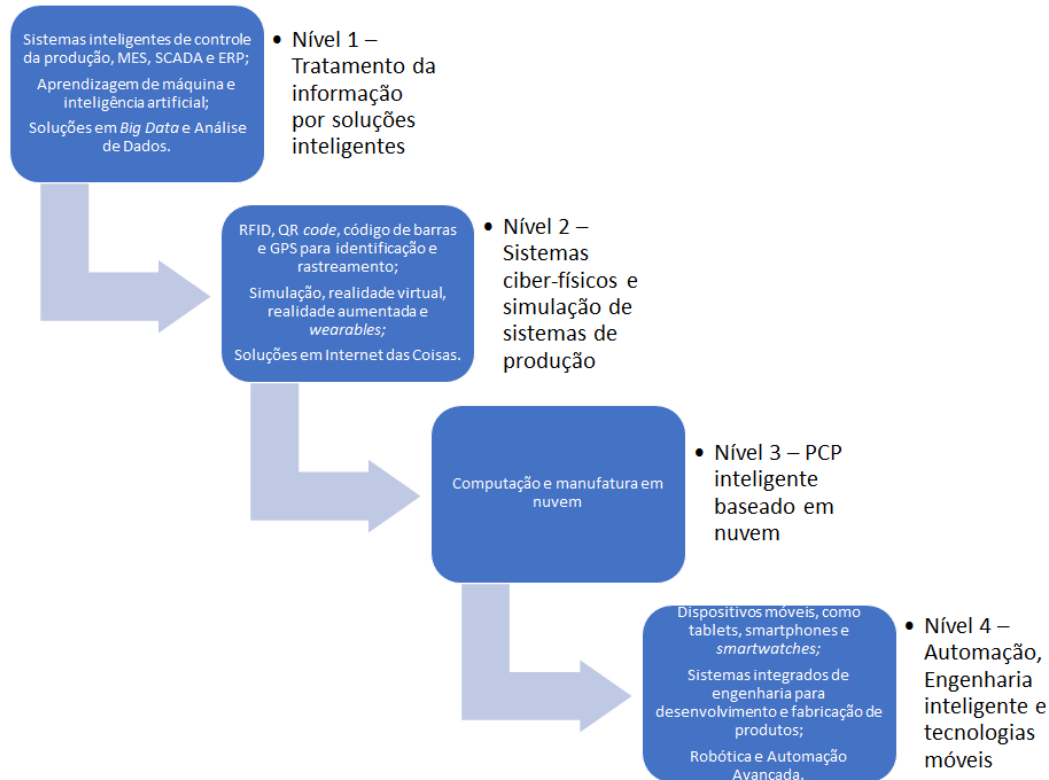
Realizando o agrupamento das tecnologias por *score* médio utilizando o algoritmo *compact letter display*, considerando diferenças significativas a um nível de confiança de 95%, chegou-se a quatro categorias de tecnologias, sendo denominadas A, B, C e D (Tabela 8). A Figura 26 mostra os quatro níveis de priorização indicados pelos especialistas para adoção de tecnologias no contexto do TPC e GP. A seguir, será realizada uma discussão sobre os resultados apresentados na Tabela 8 à luz da teoria em Indústria 4.0 e TOC.

Tabela 8 - Agrupamento das tecnologias da Indústria 4.0 por nível de suporte, aplicando o algoritmo *compact letter display*

Tecnologia	Grupo 95%	Score médio
Sistemas inteligentes de controle da produção, MES, SCADA e ERP (T6)	A	0,635554959
Aprendizagem de máquina e inteligência artificial (T7)	A	0,602514399
Soluções em <i>Big data</i> e Análise de Dados (T2)	A	0,598558085
RFID, QR <i>code</i> , código de barras e GPS para identificação e rastreamento (T8)	B	0,547678872
Simulação, realidade virtual, realidade aumentada e <i>wearables</i> (T1)	B	0,532074362
Soluções em <i>Internet</i> das Coisas (T3)	B	0,504354303
Computação e manufatura em nuvem (T5)	C	0,445875945
Dispositivos móveis, como tablets, <i>smartphones</i> e <i>smartwatches</i> (T9)	D	0,416648328
Sistemas integrados de engenharia para desenvolvimento e fabricação de	D	0,392910791

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 27 - Tecnologias da Indústria 4.0 por nível potencial de suporte para atividades do TPC e GP



Fonte: Elaborada pelo autor.

Cada um dos níveis mostrados na Figura 26 será detalhado e discutido nas seções seguintes.

- Nível 1 – Tratamento da informação por soluções inteligentes

Os grupos tecnológicos identificados na categoria A foram os sistemas inteligentes de controle da produção, a aprendizagem de máquina e inteligência artificial e soluções baseadas em *big data* e *data analytics*. Estas tecnologias apresentam, na concepção dos especialistas consultados, maior potencial de apoiar as atividades de TPC como um todo, visando o objetivo de aumento do ganho e redução de investimento e despesas operacionais.

Era esperado que sistemas de controle da produção, como MES/SCADA e ERP, fossem bem avaliados pelos especialistas, visto que já são sistemas integrados às atividades do TPC desde sua concepção, sendo inovações da Terceira Revolução que



evoluíram recentemente com aplicações inteligentes. Frank et al. (2019) mostram que as indústrias de manufatura brasileiras veem mais facilidade na implementação de tecnologias mais consolidadas como as baseadas no MES/SCADA, o que pode ter contribuído para a predileção dos especialistas.

Ao se analisar a integração de tecnologias da Indústria 4.0 em ambientes *Lean Six Sigma*, foi encontrado que programas MES/SCADA podem fazer interface com as tecnologias inteligentes instaladas nas máquinas, estações de trabalho e equipamentos de logística, visando coletar dados relevantes das máquinas, calcular OEE, paradas de estação de trabalho, WIP, tempos de ciclo e presença de trabalhadores, bem como melhorar a programação do processo de produção (CHIARINI; KUMAR, 2020). Isso poderia ser feito da mesma forma com os indicadores chave para o TPC como consumo de pulmões, capacidade protetiva de recursos e mudanças na programação da restrição.

Expandindo a aplicação dos sistemas gerenciais integrados tradicionais, o ERP inteligente é capaz de utilizar uma representação digital em tempo real de objetos individuais até todo o sistema de manufatura (GHOBAKHLOO, 2018). Este tipo de representação pode ser utilizado para acompanhar o desempenho de recursos restritivos de maneira detalhada, bem como subordinar os demais recursos ao comportamento observado. Os dados de *lead time* de fornecedores, níveis de WIP, tempos de *setup*, carga de trabalho, tempo ocioso, bem como de volume de demanda, volatilidade de demanda, tamanho do pedido são integrados em um ERP inteligente (DEV; SHANKAR; SWAMI, 2019), o que pode ser utilizado para regular automaticamente os programas e recursos gerenciados por TPC.

Apesar do destaque dado aos sistemas inteligentes de controle, deve-se levar em conta que não foi encontrada evidência associando MES/SCADA a benefícios operacionais, o que surpreendeu inclusive os pesquisadores que conduziram estudo sobre o tema (DALENOGARE et al., 2018). Da mesma forma, o ciclo de atividades em um sistema ERP, que compreende a integração de dados sobre pedidos, produção e distribuição de bens, dentro da Indústria 4.0, pode ser diverso, sendo necessário adaptação à especificidade da empresa. Isso significa o uso conjunto de soluções em IoT e IoS e de sistemas ciberfísicos para monitoramento, otimização e iniciação de processos. No ciclo de produção, isso significa que o ERP inteligente registra e monitora o andamento dos processos físicos, que, no ciclo de *feedback*, afetam o processamento dos dados nos sistemas (TORBACKI, 2019).

As tecnologias de IA, aprendizagem de máquina e *big data* estão bastante relacionadas, pois todas trabalham a coleta, tratamento e uso de dados, objetivando identificar padrões e tomar decisões no chão de fábrica. Essas técnicas têm potencial para uso nas atividades principais do TPC e GP, identificando mudanças no sistema e adaptando o planejamento e controle de acordo, de maneira inteligente e autônoma.

A atividade de monitoramento da capacidade e identificação de restrições ainda é realizada “manualmente”. A literatura não oferece soluções e orientações abrangentes e práticas que apoiem a identificação de restrições nas empresas (URBAN; ROGOWSKA, 2020). Há estudos procurando avaliar técnicas para automação do processo de identificação de restrições e de mecanismos para gerar automaticamente um modelo simulado do sistema de produção com base em um fluxograma eletrônico e dados de produção (KLOVIENE; UOSYTE, 2019). Ademais, algoritmos de aprendizagem de máquina poderiam tornar mais céleres as tomadas de decisão, com base na identificação de padrões e ações programadas (MIRZAEI et al., 2019).

Há diversos estudos que integram algoritmos de IA à programação baseada na TOC, principalmente em problemas de mix de produtos (BHATTACHARYA et al., 2008; ONWUBOLU, 2001; ONWUBOLU; MUTINGI, 2001; WANG et al., 2009). Os avanços em Ciência de Dados, particularmente em aprendizagem de máquinas, podem disseminar a aplicação desses algoritmos inteligentes no contexto do TPC. Importante destacar que há críticas para abordagem por algoritmos de inteligência artificial no contexto da TOC. Hilmola e Gupta (2015) argumentam que, apesar de alguns estudos mostrarem a superioridade de várias abordagens de otimização e IA sobre a heurística baseada em TOC para o problema de mix de produtos estático, tais estudos não conseguiram ver a TOC como um todo, ou seja, levar em consideração o impacto da interação e dependências entre recursos e flutuações estatísticas sempre presentes em qualquer ambiente de negócios dinâmico. O trabalho de Souza et al. (2013) explora as limitações de abordagens de otimização frente às heurísticas da TOC, que tentam preservar a capacidade protetiva no sistema, gerando soluções sub-ótimas, ainda que suficientemente boas.

O avanço em *big data* e IA pode criar um sistema mais robusto, menos vulnerável a pequenas discrepâncias e que também diversifique as fontes de informação (MIRZAEI et al., 2019). Em particular, *big data* tem sido usado em ambientes *lean* para reduzir erros de previsão (MISHRA et al., 2020). Apesar de a TOC evitar fazer uso de métodos de previsão convencionais (o gerenciamento do pulmão é uma forma

alternativa de se fazer previsões em ambientes MTA) para o curto prazo, a TOC ainda depende de previsões para horizontes mais longos, considerando tendências e sazonalidade e, sobretudo, incorporando a avaliação da dispersão em uma faixa de valores previstos (SCHRAGENHEIM, 2010a, 2010b). Além disso, há uso de técnicas de mineração de dados de séries temporais para apoio no ajuste dinâmico do tamanho do estoque alvo na gestão de pulmões em ambientes de distribuição e MTA (TSOU, 2013). Nestes casos específicos, técnicas de *big data* e *data analytics* podem ser aplicados com o intuito de melhorar as previsões.

Aplicações potenciais para a gestão da capacidade também são encontradas na literatura. Por exemplo, em combinação com sensores e IoT, *big data* tem sido utilizado para avaliar capacidade de recursos em tempo real. Além disso, a detecção de gargalos com os sistemas de sensores e IoT na produção pode melhorar a eficiência e estabilidade da produção, a fim de aumentar a utilização da capacidade (TSAI; LU, 2018). Ciência de Dados pode ser útil no processo de comunicação. Segundo Farkas (2018), tendo um conjunto de dados grande e variado, é possível realizar diversas análises exploratórias de dados, para encontrar indícios do gargalo, inicialmente de natureza gráfica, que serão submetidos a análises mais robustas em seguida.

O uso de tecnologias do Nível 1 é bastante presente nas inovações da manufatura enxuta e podem servir de inspiração ou mesmo de suporte complementar em ambientes TPC. Ferramentas como o mapeamento do fluxo de valor (*value stream mapping* ou VSM) auxiliam na identificação de restrições por meio do engajamento de recursos para a solução de problemas e ajudam a documentá-los. Esta ferramenta ajuda a identificar o processo restritivo (GALLI, 2018). Com uso de *big data* e computação em nuvem, a VSM receberá continuamente novos dados e informações de toda a cadeia de suprimentos, agilizando o gerenciamento do fluxo e a identificação de gargalos (VALAMEDE; AKKARI, 2020). Há na literatura usos de VSM digitais com integração de *softwares* de simulação (LUGERT; BATZ; WINKLER, 2018) e análise avançada de dados (HARTMANN et al., 2018; MEUDT; METTERNICH; ABELE, 2017; RAMADAN et al., 2020). A contribuição principal da integração de tecnologias 4.0 em VSM estaria relacionada à gravação, manipulação, processamento, análise e otimização de processos de informação e coleta de dados (TORTORELLA et al., 2020). É possível que essa contribuição apareça também nas atividades de gerenciamento de fluxo baseados na TOC.

Outro paralelo que se pode fazer entre tecnologias da Indústria 4.0 aplicadas a ambientes *lean* e TOC é o uso de Kanbans. No TPC, a Corda tem um papel de sistema de informação, pois sincroniza as informações da restrição, seja recurso ou mercado, com a liberação de materiais ou ordens de produção para os demais recursos não-restritivos. Qualquer mudança na programação da restrição leva a uma reação na liberação de materiais (*closed-loop*) (BISOGNO et al., 2017). Esse *feedback* é uma característica importante e talvez encontre suporte na análise de dados, aprendizado de máquina e inteligência artificial. Assim como o cartão Kanban seria uma “corda física” (RONEN; STARR, 1990), os Kanbans digitais podem inspirar cordas digitais.

A integração de tecnologias como IoT, RFID, serviços em nuvem e *big data* em sistemas Kanban foi denotada como *e-Kanban*, ou seja, digitalização dos cartões Kanban convencionais (LAGE JUNIOR; GODINHO FILHO, 2010; TORTORELLA; GIGLIO; VAN DUN, 2019). Um sistema com e-Kanbans auto otimizados ajusta de forma autônoma o tamanho do contêiner, bem como o número de cartões em circulação de acordo com objetivos e restrições predefinidos (BERTOLINI et al., 2019). Ademais, reconhece contêineres vazios ou perdidos via sensores e aciona o abastecimento (SANDERS; ELANGESWARAN; WULFSBERG, 2016; TORTORELLA; GIGLIO; VAN DUN, 2019). Ajustes nas políticas de estoque devido a mudanças nos tamanhos dos lotes, demandas de mercado, planos de trabalho ou tempos de ciclo tendem a ser muito mais fáceis quando tecnologias como *e-Kanban* são incorporadas ao sistema puxado (TORTORELLA; GIGLIO; VAN DUN, 2019). Esse tipo de sensibilidade pode ser aplicado a alterações na programação da corda, bem como para o ajuste dinâmico dos pulmões e estoque alvo, assim como gerar ordens no sistema MTA.

- Nível 2 – Sistemas ciberfísicos e simulação de sistemas de produção

No Nível 2, destaca-se a tecnologia de rastreamento de materiais por RFID, que é citada na literatura como tendo potencial de apoio para os métodos de identificação de gargalos, principalmente se integrada a técnicas de simulação (CHOU; WANG; SHEU, 2016). O uso de outros meios de identificação de materiais, como QR *code* e código de barras, pode melhorar a visualização dos recursos em ambientes dinâmicos, aumentando a precisão e eficiência na gestão das restrições.

Wang et al. (2016) estudam a utilização de RFID, código de barras, digitalização a laser e fotogrametria para facilitar o que eles chamam de gestão total de restrições

(*total constraint management*). Essas tecnologias tornam mais fácil para planejadores e gerentes identificarem, rastream, atualizarem e removerem restrições. RFID e sistema de posição global (GPS) são cada vez mais usados e podem ajudar significativamente os gerentes de projeto a monitorarem automaticamente o *status* da cadeia de suprimentos e as restrições do local, especialmente para rastreamento de objetos tangíveis, como materiais, equipamentos e trabalhadores. Código de barras e RFID podem ser usados para rastrear o *status* de peças durante a fase de produção, enquanto o GPS é usado para localizar automaticamente equipamentos e peças durante a fase de transporte e calcular o tempo restante até o destino, caso esse tempo seja de deslocamento seja significativo. Por fim, tecnologias de detecção e sensoriamento, como fotogrametria e varredura a laser podem monitorar restrições localizadas, como espaço de trabalho limitado, material de ordens incompletas e defeitos de construção. Estudos mais aprofundados sobre essas tecnologias em ambientes TOC seriam convenientes. Recentemente, Maphale e Smit (2020) utilizaram as técnicas de melhoria contínua baseadas na TOC para aumentar a velocidade da implantação de tecnologias de sensoriamento espacial na África.

Ainda, podem-se citar diversos estudos que exploram o uso de técnicas de simulação no contexto do TPC. Betterton e Cox (2009) propõem um modelo de simulação do TPC para estudar o controle de fluxo em linhas de produção. Usando o *software* de simulação para programar a corda, eles exploraram formas de conectar a restrição e a liberação de material, de modo que a liberação seja sincronizada com as conclusões na restrição. Já Ciechanska e Szwed (2020) validam modelos de simulação para ambientes MTA, comparando com a estratégia MTS. Outros estudos que propuseram modelos do tipo, seja em aplicações práticas, seja como método de pesquisa podem ser citados (ATWATER; CHAKRAVORTY, 2002; CASTRO; GODINHO-FILHO; TAVARES-NETO, 2020; CHAKRAVORTY, 2001; GUIDE, JR., 1996; GUIDE, 1995). Uma evolução dos resultados destes estudos pode ser uma implantação na forma de *digital twin*, com um modelo simulado do sistema de produção gerenciado por TPC, que permite que testes de programação neste modelo possam rapidamente ser implantados na fábrica real. Estudos de aplicação de *digital twins* aplicando a lógica do TPC são recomendáveis.

Um dos pilares da TOC é o axioma de que toda organização é inerentemente simples. Isso significa que apenas algumas variáveis realmente limitam o desempenho da organização, mesmo sob incerteza significativa. O uso de simulações pode ajudar a

entender um sistema aparentemente complexo e identificar regras relativamente simples para gerenciá-lo bem. Dentre os objetivos de uma simulação estão entender as causas e efeitos e o impacto da incerteza em situações específicas e apoiar a tomada de decisões difíceis. Simulações podem ser usadas para testar políticas de gestão baseadas na TOC para verificar as melhorias no fluxo decorrentes. Também se podem aplicar simulações para determinar os parâmetros corretos, como pulmões e tempos de reabastecimento apropriados (SCHRAGENHEIM, 2018b).

Outra tecnologia citada no segundo nível de priorização foi a IoT. Balaji et al. (2018) elaboraram um sistema de monitoramento de eficiência baseado em TOC e o utilizaram para otimizar a implantação de IoT em ambientes de manufatura. O objetivo foi avaliar dinamicamente as mudanças nos processos que podem mudar a restrição de local, e buscar o gerenciamento com aplicação otimizada de IoT apenas nos recursos restritivos. Por um lado, garante-se que a inteligência do sistema seja explorada para melhorar a produtividade com a aplicação de IoT. Por outro lado, a conectividade é efetivamente aplicada apenas às restrições, otimizando assim o custo (BALAJI et al., 2018).

Já Saif et al. (2019) foca sua atenção aos sistemas de manufatura baseados em IoT voltadas a problemas de planejamento e programação da produção, como é o caso de sistemas APS com aplicação de sensores. A pesquisa investiga o problema de planejamento multinível na produção de modelos mistos por meio de um algoritmo heurístico baseado em TPC, voltado à implementação de IoT e Indústria 4.0. A ideia é elaborar um plano multinível eficiente em um ambiente de produção de modelo misto com base na capacidade real disponível no RRC. Para os autores, a IoT precisa do *status* dos recursos em tempo real por meio da comunicação direta de todos os recursos, incluindo máquinas, equipamentos de manuseio de materiais e produtos. Portanto, a IoT aumentou a necessidade de desenvolvimento de modelos integrados nas instalações de produção (SAIF et al., 2019).

- Nível 3 – PCP inteligente baseado em nuvem e Nível 4 – Automação, Engenharia Inteligente e tecnologias móveis

Apenas a tecnologia de computação em nuvem aplicada em ambientes de manufatura formou o nível 3 de priorização para ambientes TOC. O uso intensivo dessa tecnologia é recente e a literatura tem tratado de aplicações dos conceitos de TOC para a computação em nuvem e não o contrário, que é o foco principal da presente pesquisa.

Li, Zhang e Luo (2017) propõem o algoritmo STDO-TOC (*Storm topology dynamic optimization algorithm based on the Theory of Constraints*). Neste trabalho, os autores usam ideias inspiradas na TOC para tratar restrições de desempenho da topologia da plataforma *Apache Storm*, sistema para computação distribuída em tempo real. Em outra aplicação, os autores propõem uma abordagem baseada na TOC para resolver a alocação de memória de armazenamento em nuvem, que usa informações de mercado para construir uma previsão contínua (CHANG; CHANG; CHANG, 2017).

Encaminhando-se para o outro extremo dos resultados, passa-se à análise dos grupos tecnológicos com menor importância atribuída pelos especialistas (Nível 4). Com relação às tecnologias móveis, elas já foram exploradas em alguns estudos sobre TOC, mas sem relação direta com suas atividades de PCP (GROOP; REIJONSAARI; LILLRANK, 2010; LEE et al., 2017; NAOR; COMAN, 2017). Groop et al. (2010) fizeram uma análise quantitativa dos dados operacionais de um hospital, encontrando um período com maior número de atendimentos e utilização dos recursos, sob a perspectiva da TOC. Portanto, aplicou-se a TOC como ferramenta de avaliação tecnológica, verificando o potencial de tecnologias móveis para aumentar a produtividade, o que não foi verificado no caso específico. Já Baveja et al. (2020), usando os cinco passos de focalização para incrementar o fluxo de cadeias de suprimento no contexto do combate à pandemia da COVID-19, adotam estas tecnologias para elevação da restrição de investigação e rastreamento dos casos.

Para ambientes *lean*, já foi citado o uso de sistemas interativos via *tablets* e *smartphones* em um sistema flexível de fornecimento de material para linhas de produção (KOLBERG; KNOBLOCH; ZÜHLKE, 2017). Com base nas demandas em tempo real, o sistema programa viagens de ida e volta para o abastecimento das estações de trabalho. A identificação das áreas de armazenamento para o abastecimento do material é realizada por códigos QR. A interação com os funcionários do sistema de abastecimento de materiais é realizada por tecnologias móveis. Algo análogo poderia ser aplicado no contexto do TPC, fornecendo informações em tempo real sobre consumo dos pulmões, capacidade dos recursos e gestão de novos pedidos, melhorando a comunicação entre diferentes setores e mesmo entre elos da cadeia. Outra aplicação de tecnologias móveis é seu uso para simulação e treinamento de funcionários na aplicação dos princípios da TOC. Este uso foi citado primeiramente por Conan e Ronen (1995) para as então recentes inovações no campo da TI.

Com relação à tecnologia de robótica e automação avançadas, a literatura em TOC também é escassa em possíveis usos para as atividades de PCP. Noh, Kim e Jang (2017), como exceção, desenvolveram uma heurística baseada na TOC (cinco passos) para programar as etapas de autolimpeza executadas por um dispositivo robótico. Fazendo um paralelo com desenvolvimentos em manufatura enxuta, Kolberg, Knobloch e Zühlke (2017) apresentam uma tentativa de combinar soluções de automação *lean* a sistema ciberfísicos. Um *framework* semelhante ao apresentado na Figura 6 poderia ser planejado para o TPC e GP, a partir de versões digitais e automatizadas dos programas de tambor e corda, controle dos pulmões e *full kitting*, por exemplo.

A literatura em TOC que versa sobre automação é bem diversa. A busca por soluções automatizadas para o processo de identificação da produção foi apontada como importante bem antes do movimento da Indústria 4.0 (HUANG et al., 2002). Também há trabalhos que exploram soluções de automação para explorar e elevar restrições. Koo, Jang e Suh (2005) estudam a aplicação de veículos autônomos (AGVs) para manipulação de material no gargalo. Já Rüttimann e Stöckli (2020) citam uma célula de manufatura gerenciada por TPC e JIT, em que o tambor é servido por supermercados puxados servidos por AGV. Ainda sobre a aplicação de AGVs, Wu et al. (2010) estudam o sistema TPC em uma fábrica de telas LCD em que lotes de vidro (matéria-prima) são transportados para as células de manufatura por duas abordagens: manual e por veículos autônomos, o que incorreu em diferentes padrões para a Corda. Com o sistema AGV, a programação de material liberado é transmitida em tempo real, portanto, sendo aplicado o método usual de programação. Porém, no sistema de transporte manual, o programa é transmitido periodicamente, o que exige agrupamento de lotes para liberação.

Por outro lado, Lea (1998) faz uma crítica ao foco na automação no contexto gerencial da TOC. Há indicação de que a contabilidade de ganhos, por exemplo, não tem desempenho adequado quando há automação significativa de processos de fabricação (LEA, 1998). Portanto, há controvérsias quanto ao uso de automação em ambientes TOC. Para a TOC, o objetivo de uma corporação não deve ser definido usando termos como tecnologia ou automação, mas como a capacidade de gerar lucros no presente e no futuro (MOTWANI; KLEIN; HAROWITZ, 1996).

Outra tecnologia com menor atribuição de importância por parte dos especialistas foram os chamados “sistemas integrados de desenvolvimento de produto e engenharia” (TORTORELLA et al., 2018). Excetuando-se a abordagem da Corrente



Crítica para gestão de projetos (BLACKSTONE; COX; SCHLEIER, 2009) e a aplicação de TPC em ambientes ETO (TELLES et al., 2020), são escassas as fontes que tratam diretamente de TOC e desenvolvimento de produtos e, conseqüentemente, sobre os impactos de tecnologias como CAD/CAE/CAM nas atividades do TPC. A principal referência neste tema publicada em periódico é de Hinckeldeyn et al. (2014), que explora a detecção de gargalos no processo de desenvolvimento de produtos e cita algumas contramedidas. Uma dessas contramedidas é aumentar a flexibilidade dos engenheiros, de modo a utilizar a capacidade de recursos alternativos. O domínio de programa CAD para projeto é uma competência usualmente compartilhada por mais de um engenheiro, podendo ser aproveitada.

Já em sua dissertação de Mestrado, Lizenka van der Walt (2007) aplica os princípios de análise de tecnologias do livro “Necessária, sim, mas não suficiente” (GOLDRATT; SCHRAGENHEIM; PTAK, 2000) e os processos de raciocínio da TOC para implantação de *software* de análise do ciclo de vida de produto, demonstrando que análises de necessidade e suficiência podem permitir que compradores de *softwares* escolham a solução mais aplicável, obtendo sucesso em iniciativas de melhoria. Destaca-se também a publicação (*white paper*) de Eli Schragenheim intitulada “*Product development projects: guidelines for assessing the potential of new products and the planning of various features in a project*”. Uma contribuição específica da TOC para a área de desenvolvimento de novos produtos é apresentada, envolvendo a avaliação do valor de novas tecnologias por meio das seis questões tecnológicas propostas por Goldratt, a fim de expandir o escopo dos novos produtos (SCHRAGENHEIM, 1998). Em nenhuma dessas publicações, sistemas integrados de engenharia são citados como tecnologias relevantes para atividades de PCP, o que pode contribuir para a baixa pontuação atribuída pelos especialistas.

Para sintetizar os resultados provenientes da análise por TOPSIS, os Quadros 10 e 11 apresentam respectivamente resultados esperados e complementares ao encontrado na literatura.

Quadro 10 - Resultados previstos na literatura com relação ao suporte das tecnologias da Indústria 4.0 às atividades do TPC

<b>Resultados esperados</b>	<b>Referências</b>
Maior suporte potencial de sistemas do tipo MES/SCADA e ERP. São tecnologias já consolidadas e com evidências no <i>Lean Six Sigma</i> .	(CHIARINI; KUMAR, 2020; DEV; SHANKAR; QAISER, 2020; FRANK;

	DALENOGARE; AYALA, 2019; GHOBAKHLOO, 2018)
Potencial de aplicação de técnicas de <i>big data</i> , aprendizagem da máquina e <i>digital twin</i> para identificação de restrições e monitoramento da capacidade.	(KLOVIENE; UOSYTE, 2019; MIRZAEI et al., 2019)
Uso de IoT para monitoramento da capacidade em tempo real.	(TSAI; LU, 2018)
Tecnologias com aplicações já disseminadas no <i>lean</i> receberam maior destaque, como uso de Ciência de Dados para análise de fluxo, inovações do VSM e <i>feedback</i> para liberação de materiais como no e-Kanban.	(BISOGNO et al., 2017; LUGERT; BATZ; WINKLER, 2018; SANDERS; ELANGESWARAN; WULFSBERG, 2016; TORTORELLA et al., 2020; TORTORELLA; GIGLIO; VAN DUN, 2019)
Boa avaliação atribuída a tecnologias de identificação e rastreamento de materiais. Literatura aponta uso de RFID na identificação de gargalos e monitoramento de recursos, principalmente em ambientes de projetos ( <i>Engineering to Order</i> - ETO).	(CHOU; WANG; SHEU, 2016; WANG et al., 2016b)
Técnicas de simulação apareceram com alta prioridade. Há modelos baseados no TPC para controle do fluxo e programação da Corda, por exemplo.	(ATWATER; CHAKRAVORTY, 2002; BETTERTON; COX, 2009; CASTRO; GODINHO-FILHO; TAVARES-NETO, 2020; SCHRAGENHEIM, 2018b)
Soluções de automação avançada e robótica ficaram nas últimas posições. Críticas à otimização das atividades são feitas na literatura.	(LEA, 1998; MOTWANI; KLEIN; HAROWITZ, 1996)
Baixa pontuação de sistemas integrados de desenvolvimento de produto e engenharia. Na literatura de TOC sobre PDP, uso de tecnologia não tem papel relevante.	(HINCKELDEYN et al., 2014; SCHRAGENHEIM, 1998; WALT, 2007)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 11 - Resultados inesperados sobre o suporte potencial das tecnologias da Indústria 4.0 às atividades do TPC

<b>Resultados surpreendentes</b>	<b>Possíveis explicações e eventuais recomendações de pesquisas futuras</b>
Destaque a aplicações de técnicas de IA, quando há críticas na literatura em TOC sobre seu caráter de otimização local (HILMOLA; GUPTA, 2015).	Aplicações similares bem sucedidas em outros ambientes, como no <i>lean</i> (MIRZAEI et al., 2019), e uso para previsões de longo prazo, por exemplo, com mineração de dados de séries temporais. Pesquisa futura: Estudo de casos de adoção de IA em aplicações de TOC, classificando o tipo de modelos e área de aplicação, bem como benefícios e limitações do uso.
Computação em nuvem apresentou prioridade superior a tecnologias mais tradicionais como robótica e automação avançada e tecnologias móveis. A literatura atual apenas trata de aplicações de conceitos da TOC na computação em nuvem e não do contrário.	Uma hipótese é que os especialistas se referiam ao tratamento de restrições de infraestrutura, típicas em empresas de TI e tecnologicamente desenvolvidas, o que é comumente tratado com soluções de computação em nuvem.
Tecnologias móveis ficaram entre os últimos lugares para suporte do TPC.	Predileção da TOC por soluções práticas, de fácil implementação, podem tornar o uso de soluções digitais e interativas menos necessário. Pesquisa futura: Avaliar a digitalização de algumas

	etapas do TPC, por exemplo as relacionadas ao ajuste e monitoramento de pulmões.
--	--

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.2. ETAPA QUALITATIVA

O questionário com perguntas dissertativas aplicado aos especialistas de TOC envolveu quatro questões, duas requisitando comentários sobre os resultados da etapa quantitativa e duas envolvendo temas gerais sobre a relação entre Indústria 4.0 e TOC. Aqui, serão compiladas e discutidas a opinião emitida por nove especialistas, que responderam ao convite realizado para a segunda etapa. Oito deles responderam completamente o questionário e um apenas a última questão. Para organizar essa seção de apresentação dos resultados, as respostas serão apresentadas por questão.

- Questão 1 – Benefícios dos métodos e filosofia da TOC para organizações que desejam implantar tecnologias da Indústria 4.0

Nesta primeira parte, os especialistas responderam à seguinte questão: Em sua opinião, como as empresas que buscam implementar tecnologias da Indústria 4.0 podem se beneficiar dos métodos e da filosofia da Teoria das Restrições?

Na opinião de um dos entrevistados, os métodos e a filosofia da Teoria das Restrições permanecerão válidos mesmo quando o ambiente de produção/manufatura mudar. Devido à maior flexibilidade de produção e lotes menores (reduzidos, no limite, a uma peça), conforme prometido pelos desenvolvedores da Indústria 4.0, os tipos de restrições podem mudar e novos surgirão, talvez em outros locais do sistema de produção. Mas, ainda assim, as premissas da TOC continuariam válidas. Outro participante citou a TOC como guia para tomada de decisões. Outros apontaram que a adoção da TOC continuaria importante, pois, em um ambiente 4.0, as organizações teriam menos restrições em seus sistemas, permitindo que as tecnologias utilizadas fossem mais simples, demandando menos tempo para implementação, custando menos e sendo mais fáceis de serem aprimoradas posteriormente. A visão apresentada pelos especialistas vai ao encontro do exposto por Goldratt e colegas em “Necessária sim, mas não suficiente” (GOLDRATT; SCHRAGENHEIM; PTAK, 2000), e desenvolvida na série de vídeos que seguiram a publicação do livro (GOLDRATT, 2002). Por meio das seis questões tecnológicas, a TOC avalia o valor das novas tecnologias em termos de impacto sobre as restrições do sistema. Além disso, o foco da TOC na definição de

políticas de produção adequadas, antes de qualquer investimento em tecnologia, ainda é relevante mesmo neste novo contexto.

Um respondente indicou que, para implementar qualquer tecnologia, os gerentes devem primeiro entender o que seus clientes querem e como eles atualmente não conseguem entregá-lo. Em seguida, eles devem alterar seu processo para agregar valor manualmente. Só após a implantação manual, eles devem implementar qualquer tecnologia. Outro especialista ainda indicou que o benefício monetário da implantação de TOC deve ser sempre apresentado aos gestores, inclusive no contexto de implantação de tecnologias digitais. Este tipo de análise pode ser feita por meio da Contabilidade de Ganhos, que envolve a análise do impacto global de ações gerenciais no ganho, despesas operacionais e investimentos, garantindo que os benefícios sejam objetivamente quantificados (GARCÍA-VIDAL et al., 2019; GUPTA; ANDERSEN, 2018; SCHRAGENHEIM; CAMP; SURACE, 2019).

Na mesma linha de implementação focada, um especialista citou que a TOC ajudaria a “investir em coisas que deveria fazer e não em coisas que não deveria fazer”. Para outro, seguindo a linha de Goldratt, Schragenheim e Ptak (2000), qualquer sistema tem uma etapa limitadora. A menos que a nova tecnologia supere uma limitação, ela terá pouco impacto no sistema. Os desenvolvedores e fornecedores da nova tecnologia precisariam levar isso em consideração. Antes de implementar quaisquer novas tecnologias, deve-se responder às questões: Qual é o problema (limitação) que se está tentando resolver? O cliente potencial tem esse problema? Estas questões são exploradas teoricamente em Goldratt (2006), com mais detalhes e aplicações na área de desenvolvimento de produtos no trabalho de Schragenheim (1998).

Um participante sugere que a empresa, primeiramente, deve definir o fluxo global da cadeia de suprimentos em que está inserida, entendendo os tipos de bloqueios ou alavancagens ao fluxo. O dicionário da TOCICO (COX et al., 2012) define bloqueio, no contexto da TOC, como uma condição em que a restrição é forçada a ficar ociosa porque as estações de trabalho a jusante não são capazes de aceitar o material processado pela restrição e o espaço de armazenamento para o material não está disponível. Bloqueio, falta de material e paradas da restrição são de particular importância na TOC, pois o ganho é reduzido sob essas condições. Em contraste, na manufatura tradicional, esse termo também se aplica às não restrições.

Ainda, para o especialista, muitas vezes, o fascínio de novas tecnologias direciona a atenção para lugares que não são bloqueios nem alavancagens para o fluxo.

No caso específico da Indústria 4.0, há pouco ou nenhum suporte à integração entre empresas em comparação com a integração dentro de uma empresa. Esta falha na atuação da Indústria 4.0 no contexto de cadeia de suprimentos poderia ser resolvida usando a abordagem da TOC. Para a TOC, a alavancagem ao fluxo é conseguida com ações sobre os poucos componentes do sistema, físicos ou lógicos, que são fonte de mudança significativa no desempenho (COX et al., 2012). Pulmões estrategicamente posicionados e gerenciados são um importante elemento de proteção de pontos de alavancagem. Apesar do especialista não enxergar suporte direto das tecnologias da Indústria 4.0, melhorias na identificação e gerenciamento do pulmão pelas tecnologias digitais poderiam ter impacto positivo, visto as iniciativas com tecnologias móveis e IoT, por exemplo (FARKAS, 2018; SAIF et al., 2019; TSAI; LU, 2018).

Outra opinião envolveu ressalvas quanto à utilização de tecnologias, pois, para esse especialista, a Indústria 4.0 é um conglomerado de tecnologias, algumas das quais existem há mais de 30 anos, como a IA. A ideia principal seria usar todas as tecnologias disponíveis para fornecer melhores soluções para os mesmos problemas ou para problemas mais novos. Isso significaria que a TOC, como muitas outras metodologias ou filosofias de melhoria, poderia se beneficiar dos avanços tecnológicos. Ele questiona se, caso a empresa tenha dados granulares de cada movimento do fluxo, teria necessariamente decisões melhores. Para ele, em alguns casos, sim, se os princípios da TOC forem mantidos. Portanto, a tecnologia deveria ser direcionada para o gerenciamento de restrições e não impulsionada apenas por ser sofisticada. Alguns dos estudos recentes envolvendo aplicações de IoT e TPC (BALAJI et al., 2018; SAIF et al., 2019) demonstram a adaptação da tecnologia às heurísticas já adotadas tradicionalmente em sistemas baseados em TOC.

Na mesma linha, outro participante citou que a TOC permite que as empresas assegurem que o uso destas tecnologias emergentes realmente está gerando valor a longo prazo para a organização. Muitas empresas tendem a adotar uma tecnologia só para seguir uma tendência. As bases filosóficas sólidas e os indicadores de desempenho da TOC permitem que a organização não se desvie do seu foco, adotando aquelas tecnologias que realmente apoiem o cumprimento de seus objetivos. Este especialista também foi o único a apontar a abordagem da corrente crítica da TOC para a implementação destas tecnologias, que seria mais eficaz por meio de projetos bem gerenciados. Segundo Apaolaza et al. (2020), métodos modernos de gestão de projetos

como CCPM reduzem significativamente o impacto das incertezas, presentes em ambientes com aplicação das tecnologias digitais.

Ainda tratando de sofisticação das tecnologias, outro entrevistado recorda que o principal benefício da TOC é a simplificação da abordagem. Para ele, há muito espaço para criar sofisticação em qualquer tecnologia. Na maioria das vezes, a sofisticação no nível do usuário é percebida como compreensível. No entanto, ele acredita que muitos recursos e opções apenas desviam a tecnologia das necessidades essenciais. Ele ainda recorda a definição da TOC em uma palavra usada por Goldratt: foco. Segundo Schragenheim, o TPC já possui ferramentas como a gestão dos pulmões que tratam variabilidade nos processos naturalmente, sem a necessidade de ferramentas sofisticadas, dando preferência à simplificação (SCHRAGENHEIM, 2015b). Na opinião de outro respondente, os métodos e a filosofia da Teoria das Restrições podem contribuir com o foco necessário para que as empresas consigam identificar e explorar seus principais pontos de alavancagem com as facilidades proporcionadas pelas tecnologias da Indústria 4.0. Na perspectiva de Goldratt (2006), esta análise deveria ser feita em termos de identificação das limitações que essas tecnologias apresentam, acompanhada de avaliação e alteração das regras que acomodam essa limitação.

- Questão 2 – Comentários sobre as tecnologias mais bem avaliadas na etapa quantitativa em relação ao suporte às atividades de TPC e GP

A segunda questão fornecida aos especialistas foi: “Em sua opinião, por que as tecnologias MES, SCADA e ERP, aprendizado de máquina, inteligência artificial, *big data* e *data analytics* foram identificadas como as que mais contribuiriam para as atividades de TPC e GP?”. Assim, eles foram convidados a comentar os resultados com maior destaque na etapa anterior da pesquisa.

No nível de maior importância (Nível 1), afirma um dos participantes, o foco na identificação da restrição do sistema beneficia a eficiência dos sistemas inteligentes de controle da produção que, apoiados por tecnologias como *machine learning* e IA, melhoram a busca por soluções globais e a rapidez da tomada de decisão por gestores (decisão humana apoiada por recursos tecnológicos). Além disso, as soluções de *big data* e análise de dados viabilizam um ambiente propício para a integração e coordenação, desde os sistemas de produção até os estágios de cadeias de suprimentos. Essa visão é compartilhada por Farkas (2018), que afirma que tendo um conjunto de dados grande e variado, poder-se-ia realizar uma análise exploratória de dados de forma

a identificar a assinatura do gargalo. Na visão de outro especialista, sistemas de produção *Engineering-to-Order* (ETO) seriam particularmente beneficiados por tecnologias da Indústria 4.0 em ambientes TOC. Recentemente, foi atestado o aumento de eficiência em sistemas ETO por meio da aplicação de TPC (TELLES et al., 2020), o que pode ser potencializado com suporte tecnológico apropriado.

Para um dos respondentes, este conjunto de tecnologias fornece informações em tempo real para controlar o chão de fábrica. Para outro, os sistemas de produção serão orientados por dados via IoT e outras tecnologias. As instruções de trabalho para humanos, robôs com suporte humano ou robôs puros, precisam de informações em tempo real para trabalhar com eficiência. Informações e materiais devem ser gerenciados e controlados por sistemas de computador com a ajuda de MES, SCADA, ERP e/ou sistemas completamente novos. O aprendizado de máquina e a análise de dados, como parte da IA, podem ajudar a otimizar o planejamento e a execução da produção até o chão de fábrica, de modo que informações e materiais estejam disponíveis no lugar certo e na hora certa. O trabalho de Helo e Hao (2021) cita aplicações de IA para o PCP, principalmente para gestão automatizada da qualidade, otimização da produção e melhoria da capacidade, bem como para redução do *lead time*. Mesmo quando é possível implementar métodos *Lean* (*Takt Time*, *Kanban*), a necessidade de controlar/monitorar o fluxo e considerar possíveis restrições permanecerá. Na visão deste especialista, devido à maior flexibilidade dos sistemas de produção no futuro, vai aumentar a necessidade de identificar restrições estratégicas, com métodos apropriados baseados nas lógicas TPC e GP, de forma a alinhar todas as atividades de produção.

Um dos participantes recorda que sistemas como o MES, SCADA e, principalmente, ERP são tecnologias mais consolidadas e que já geram dados para implementações de TOC atualmente. As demais ferramentas são voltadas a análise estatística de dados. Para um estudo da integração de sistemas ERP em ambientes TOC, indica-se o trabalho de Lea (2007). Na sua visão, elas podem ter se destacado por seu potencial em apoiar a determinação de restrições no sistema e permitir o controle do sistema em tempo real, com a aquisição de dados precisos e acurados. Outro especialista também citou a identificação de restrições como o principal foco destas tecnologias voltadas à informação. Esta visão dos especialistas é compartilhada por pesquisas recentes com esse viés de identificação de restrições por meio de análise avançada de dados (CHOU; WANG; SHEU, 2016; KLOVIENE; UOSYTE, 2019; MIRZAEI et al.,

2019). O primeiro apenas faz uma ressalva de que o uso intensivo de técnicas estatísticas complexas e otimizadoras pode se opor à característica simplificadora da TOC, o que foi explorado por outros respondentes.

Ainda tratando do destaque conferido aos ERPs, foi citado por um dos participantes que seu uso é fundamental em organizações industriais para controlar a produção e coletar dados a partir dela. Além disso, o TPC e GP podem se beneficiar das tecnologias 4.0, já que dependem de *softwares* que permitem o armazenamento, extração e transformação de dados em tempo real e do acesso à informação de forma rápida e confiável, e sistemas como ERP tem importante papel neste processo. Esta visão foi corroborada por outro especialista que citou que o destaque destas tecnologias pode ter se dado por elas fornecerem os dados necessários para o funcionamento do TPC/GP. A literatura aponta como um dos indicadores de PCP inteligente (*smart PPC*) seria a agilidade e capacidade de resposta de manufatura (envolvendo máquinas e recursos, sistemas de manufatura, chão de fábrica). Assim, no contexto da Indústria 4.0, o gerenciamento deveria fornecer capacidade de resposta para a produção reagir rapidamente às mudanças. Por exemplo, a coleta de dados em tempo real permite atribuição automática de tarefas em sistemas APS habilitados para IoT, que reagem a uma maneira responsiva à mudança para produção de pequenos lotes (BUENO; GODINHO FILHO; FRANK, 2020). Algo análogo poderia ser esperado para aplicação no TPC. Outros dois respondentes citaram que “essas tecnologias podem acelerar o fluxo de informações para aqueles que tomam decisões de gerenciamento do TPC” e que “podem ser utilizadas para auxiliar na automação e processamento de dados, ajudando a executar o TPC de forma mais fácil e automática”.

Outros especialistas se colocaram como opositoristas à visão da maioria que participou da etapa anterior. Um deles afirma que, excetuando-se os sistemas ERP e SCADA, que ele vê como tecnologias necessárias para reunir dados suficientes para gerenciar o sistema por TOC, as demais não teriam valor suficiente para suportar as atividades de TPC/GP. Ele indica que não consegue enxergar qual limitação do sistema será removida com tecnologias como IA, aprendizagem de máquina e análise avançada de dados. Ressalta-se que essa preocupação faz parte do arcabouço teórico da TOC, por meio da análise pelas seis questões tecnológicas (GOLDRATT, 2006; SCHRAGENHEIM, 1998). Ainda lembra que, em geral, qualquer tecnologia deve ser julgada apenas em relação à capacidade de remover uma restrição ativa. O processo de remoção de restrições ativas foi explorada em diversos estudos (MABIN; DAVIES,



2003; MABIN; GIBSON, 1998; SIMATUPANG; WRIGHT; SRIDHARAN, 2004). Outro especialista foi ainda mais crítico, ao apontar essas tecnologias como prováveis obstáculos às atividades de TPC/GP, reduzindo seu desempenho. Apesar deste participante não ter desenvolvido com mais detalhes sua opinião, deduz-se que ele esteja se referindo à tendência à simplificação, que está na base da construção das ferramentas da TOC. A simplicidade inerente é um dos axiomas em que a TOC se baseia (IKEZIRI et al., 2019).

Para outro participante, qualquer tecnologia pode ser boa se o seu objetivo e propósito estão bem definidos, e quais são os problemas a serem resolvidos, o que envolveria gerenciar restrições no caso da produção. Para ele, a TOC deve mostrar quais dessas tecnologias e métodos podem ajudar, mas criar modelos de previsão mais sofisticados usando *big data*, *data analytics*, IA e ERP seria o caminho errado. Por outro lado, se estas tecnologias melhorassem a resposta à demanda, ele não veria por que não deveriam ser adotadas. Ao avaliar o impacto moderador da Indústria 4.0 na relação entre práticas *Lean* e melhoria de desempenho operacional (produtividade, nível de serviço de entrega, estoque, qualidade e segurança) no setor de manufatura brasileiro, Tortorella, Giglio e Van Dun (2019) concluíram que as tecnologias da Indústria 4.0 relacionadas ao processo moderam negativamente os efeitos de baixos tempos de *setup* no desempenho, e as tecnologias relacionadas ao produto/serviço moderam positivamente o efeito das práticas de aumento do fluxo no desempenho. O estudo concluiu que a implementação puramente tecnológica não levará a melhorias e resultados sustentáveis; as práticas enxutas podem atuar como precursoras para a implementação da Indústria 4.0. Uma indicação semelhante poderia ser feita com relação às práticas da TOC antecederem a implementação tecnológica.

- Questão 3 - Comentários sobre as tecnologias com menor importância atribuída na etapa quantitativa em relação ao suporte às atividades de TPC e GP

Foi perguntado em seguida aos respondentes: “Em sua opinião, por que tecnologias móveis (*tablets*, *smartphones*, *smartwatches*), sistemas integrados de engenharia, desenvolvimento e fabricação de produtos e robótica e automação avançada foram identificados como aqueles que menos contribuiriam para as atividades do TPC/GP?”. Dessa forma, tentou-se verificar a visão destes especialistas sobre essas tecnologias e seu baixo suporte potencial para o TPC/GP.

Na percepção de um dos participantes, estas tecnologias, quando comparadas com as que apresentaram maior contribuição, são mais afastadas das atividades de PCP. Tecnologias móveis têm uso muito amplo (podem ser usadas tanto em rotinas administrativas quanto no chão de fábrica para gerar dados). Apesar disso, alguns estudos vêm explorando usos desse tipo de tecnologia (GROOP; REIJONSAARI; LILLRANK, 2010; LEE et al., 2017). Já automação e robótica não teriam influência na implementação de métodos de PCP. Estas tecnologias poderiam ser entendidas como recursos de manufatura, mas não apoiariam diretamente o processo de implementação, que é administrativo. De fato, as aplicações da Indústria 4.0 são naturalmente voltadas para a manufatura e apenas recentemente têm sido estudadas as aplicações para tomada de decisão gerencial e em gestão de operações (HELO; HAO, 2021; IVANOV et al., 2021). Ele também afirma não perceber como a forma que uma empresa desenvolve seus produtos facilitaria ou dificultaria uma implementação de TPC. Na mesma linha, outro participante afirma que as tecnologias não se destacaram por serem muito gerais. Um terceiro afirma que elas são mais adequadas para lidar com sistemas em sua globalidade. A avaliação do impacto global é um tema central para a TOC (GARCÍA-VIDAL et al., 2019; ROTA; DE SOUZA, 2021) e é válida para a aplicação tecnológica.

Outro especialista afirmou que elas pertenceriam a um segundo estágio de implantação, sendo o primeiro o alinhamento das atividades propostas pela TOC com *big data* e IA. Na visão deste respondente, em um segundo estágio, essas tecnologias podem auxiliar no nível de processo, otimizando operações de gargalo e sincronizando todos os recursos com o Tambor. Essa sincronização promove o fluxo contínuo, programando sistemas complexos de maneira flexível (PONTE et al., 2016; RONEN; STARR, 1990; WAHLERS; COX, 1994). Uma outra visão apresentada por um dos participantes é a de que esse grupo de tecnologias seriam mais ligadas a outras áreas de aplicação da TOC como distribuição e gestão da cadeia de suprimentos. De fato, aplicações como *big data* (LAI; SUN; REN, 2018; QUEIROZ; FARIAS PEREIRA, 2019; QUEIROZ; TELLES, 2018), IoT (LEE et al., 2018; MATANA et al., 2020) e *blockchain* (DOLGUI et al., 2020; POURNADER et al., 2020) já são amplamente adotadas na logística.

Especificamente com relação a tecnologias móveis, foi citado que as informações do chão de fábrica, necessárias para a gestão no TPC, podem ser enviadas diretamente por meio do sistema de controle da produção, sem necessidade de tecnologias móveis. Já para outros especialistas, com visão oposta à maioria da etapa

anterior, estas ferramentas podem facilitar o fluxo de informações, o que é corroborado por Kolberg et al. (2017), que afirma que tecnologias digitais, ao automatizar processos repetitivos de agregação de valor podem melhorar o fluxo de informações e atender às demandas do mercado. Este fluxo é importante para a gestão por TPC, além de que essas tecnologias podem promover maior volume e facilidade de visualização de dados.

Para outro especialista, o TPC e o GP dão uma sensação global da operação e não precisam de detalhes imediatos baseados em tarefas. No entanto, para gerenciamento de projeto por CCPM (ou em ambientes de fábrica com tarefas de longa duração), dispositivos móveis poderiam ser muito úteis na comunicação de prioridades imediatas de tarefas/recursos. Segundo Whyte (2019), a digitalização na gestão de projetos permite maior compartilhamento, acesso remoto, pesquisa e atualização de informações, com visibilidade nas cadeias de suprimentos e com operadores e usuários finais. Nenhum estudo tratou especificamente das relações entre CCPM e Indústria 4.0, o que poderia ser realizado nos moldes do presente trabalho. Na visão de outro especialista, as tecnologias móveis estão cada vez mais presentes no cotidiano, mas seu uso contribui para facilitar o acesso à informação em tempo real, o que já é evidenciado na sua aplicação em gestão da cadeia de suprimentos (BARATA; RUPINO DA CUNHA; STAL, 2018), enquanto as demais tecnologias da Indústria 4.0 atuam diretamente na forma como a informação é processada, sendo estas, portanto, priorizadas.

Tratando-se de sistemas integrados para engenharia, manufatura e desenvolvimento de produtos, um especialista indicou que para a parte de engenharia/*design* o resultado pode ter sido baixo por sair do foco da produção tradicional, mas com relação à manufatura, afirma que pode ter papel importante para definir futuras restrições. Este tipo de aplicação é menos citada na literatura, aparecendo em poucos trabalhos empíricos, que citam sistemas integrados como importantes fontes de redução do tempo de *setup* e de melhoria do desempenho operacional, principalmente devido a uma redução na complexidade por modularização (DALENOGARE et al., 2018; TORTORELLA et al., 2021; TORTORELLA; GIGLIO; VAN DUN, 2019). Também cita robótica avançada e automação como capacidades importantes a serem consideradas no futuro. Na perspectiva de outro respondente, em relação à automação e ao desenvolvimento de produtos, o aumento da eficiência apenas pode ser justificado nas restrições dos sistemas. A abordagem TOC, quando aplicada à interface do desenvolvimento de produto e manufatura, se concentra no gerenciamento e

na identificação de um único fator limitante no processo de projeto. Após a identificação do fator limitante, segue um processo especificado para melhorar ou eliminar a restrição em cada etapa. Logo, as demais tecnologias da Indústria 4.0 possuem potenciais superiores para impactar os sistemas de forma global, agindo sobre fatores limitantes do sistema.

Outro respondente aponta que o principal obstáculo à produtividade em um processo de manufatura convencional é o excesso de estoque em processo (WIP), seguido pela falta de prioridades claras e objetivas. O TPC-S prevê o congelamento do WIP excessivo para evitar sobrecarga do sistema. É possível que sejam liberadas ordens com antecedência para preencher a capacidade disponível durante os períodos de baixa demanda. Mas, quando liberadas mais cedo, as filas se enchem rapidamente e, uma vez que a demanda aumenta, as células novamente ficam congestionadas com ordens incompletas. Para evitar isso no TPC-S, os pedidos devem ser liberados apenas na ordem estabelecida no pulmão para garantir que multitarefa e desequilíbrio de carga não ocorram (CHAKRAVORTY; HALES, 2016). Na visão dele, todas essas tecnologias podem ajudar a acelerar processos isolados, mas poucas delas (ou nenhuma) irão ajudar a visualizar qual é a quantidade de WIP para que o gerente possa tomar decisões sobre liberar ou não mais ordens de produção, e tomar decisões sobre a melhor sequência em cada centro de trabalho.

Para outros especialistas, as tecnologias citadas são de pouco valor, podendo atrapalhar o fluxo de trabalho do TPC e GP, ao atuar no ruído da variabilidade. A melhoria do fluxo tem sido um tema central no gerenciamento de operações e pode se tornar ainda mais importante no contexto dos avanços tecnológicos da manufatura inteligente. Vieses gerenciais têm impacto no fluxo e não são resolvidos simplesmente por meio do uso de novas tecnologias, mas podem ser facilmente incorporados em novas tecnologias, como gêmeos digitais, por exemplo (LAND et al., 2021).

- Questão 4 – Benefícios gerais da Indústria 4.0 ao TPC/GP

A quarta questão - “Em geral, em sua opinião, como o TPC e o GP podem se beneficiar das tecnologias digitais da Indústria 4.0” - procurou deixar os especialistas livres para discutir possíveis conexões entre as tecnologias da Indústria 4.0 e as práticas propostas pela TOC, sem se prender aos grupos estudados na etapa quantitativa.

Para um dos participantes, a Teoria das Restrições é uma filosofia de gerenciamento global e seus métodos e ferramentas visam a identificação das pequenas mudanças necessárias que podem impactar o sistema de forma holística. Essa definição é corroborada por Watson et al. (2007), que aponta a evolução da TOC desde a criação do OPT até o desenvolvimento de uma filosofia gerencial, com práticas e princípios em diferentes áreas e subdisciplinas. Sendo assim, as tecnologias da Indústria 4.0 podem beneficiar o TPC e o GP com o apontamento em tempo real dos pontos que necessitam de atenção gerencial, contribuindo para o foco necessário, mencionado na primeira questão.

Segundo outro especialista, adotando as tecnologias digitais da Indústria 4.0, o fluxo de informações pode ser mais facilmente implementado, e o fluxo informacional seria a chave para controlar os fluxos físicos. Sendo assim, o TPC e o GP teriam suas operacionalizações facilitadas. Ainda, para outro especialista, a digitalização promovida pela Indústria 4.0 abandonaria grande parte dos controles manuais, o que facilitaria o gerenciamento no TPC. Também foi citado que o principal benefício que TPC e GP poderiam obter com as tecnologias da Indústria 4.0 é a automação de uma grande quantidade de análise de dados e alertar os gerentes sobre a melhor decisão a tomar. De acordo com Kusiak (2018), tecnologias da quarta revolução permitem a coleta de dados em tempo real em toda a cadeia de abastecimento, de fornecedores a usuários. Esses dados são aplicados para aprimorar sua operação, projetos e produtos por meio de *feedback* instantâneo, melhorando assim a produtividade (ROBERT; GIULIANI; GURAU, 2020).

Outro especialista afirmou que as tecnologias podem fornecer informações em maior velocidade, com mais confiabilidade e com menor custo, permitindo melhorias sistêmicas muito mais rápidas. Isso significaria que os ciclos de melhorias globais (não no processo ou locais), em vez de ocorrerem, por exemplo, em ciclos de alguns meses, poderiam ser executados em ciclos de alguns dias. Ele cita que seria a passagem da antiga melhoria contínua para uma tendência de "melhorias de salto quântico", com resultados dramáticos no desempenho. Além disso, foi apontado que a comunidade de TOC deve estar preparada para encontrar novas soluções para os ambientes em mudança acelerada. Segundo Tortorella et al. (2019), a iniciativa isolada de se investir em tecnologia de ponta, sem lidar com a melhoria e *design* de processos sistêmicos, não implica melhor desempenho operacional. Para os autores, a adoção de tecnologias apenas em termos de aumentar o nível de automação é um equívoco, levando a um

arranjo de fábrica mais rígido. Nesse sentido, caso ocorra uma adoção equivocada de tecnologias relacionadas a processos, as empresas podem ter conflitos com as práticas de redução dos tempos de *setup*, acarretando um efeito negativo no desempenho operacional.

Um dos participantes apresentou uma discussão particular sobre o uso de algoritmos para gerenciamento de sistemas de produção. Segundo ele, em muitas indústrias, existem muitas partes inter-relacionadas. No mundo da programação "orientada pela demanda" (principalmente no mundo de múltiplos projetos repetitivos), há muitos cálculos de *background* necessários para determinar as prioridades corretas às partes móveis do sistema. Na visão do respondente, partes móveis seriam todos os detalhes em constante mudança das várias atividades simultâneas, que não são possíveis de serem suficientemente amortecidas sem grandes estoques. Esses cálculos seriam determinados com precisão suficiente apenas com algoritmos por computador, que então podem ser resumidos e as prioridades entregues para a ação apropriada. Pode-se citar uma análise de *big data* na literatura, que apresenta evidências de melhorar a qualidade do planejamento da demanda (FATORACHIAN; KAZEMI, 2020). Porém, a gestão da cadeia de suprimentos deve incluir tarefas de tomada de decisão mais sofisticadas que não podem ser realizadas por algoritmos e análise de dados, uma vez que se espera que a intuição, a confiança e a experiência continuem a ser competências essenciais que não podem ser simuladas em um futuro próximo (ROSSMANN et al., 2018).

Já outro especialista cita que as tecnologias da Indústria 4.0 podem ser utilizadas para fornecer automação de processo para (1) o monitoramento do *status* do pulmão, que pode acionar a liberação de material (sob condições de ter *full kit*), (2) evitar a liberação de componentes desnecessários, que causam deficiências de *full kit*, (3) o rastreamento de WIP (especialmente estoque em movimento), por meio do monitoramento de fluxo de valor e (4) o monitoramento do fluxo de WIP para o RRC. Para Grassi et al. (2020), uma arquitetura de controle da produção baseada na Indústria 4.0 deveria ter em um primeiro nível uma evolução do sistema ERP clássico. Ele mantém a coordenação das atividades na fábrica, observando e controlando continuamente o tempo de ciclo dos pedidos e a produtividade do sistema, enquanto não é mais responsável pelo planejamento detalhado da produção. Monitorando os desempenhos do sistema, em termos de tempo de ciclo médio e *throughput*, e os pedidos em andamento nos níveis inferiores, o sistema define as liberações de pedidos e

os desempenhos pretendidos a serem alcançados. Desta forma, a produção não é mais antecipada por meio da imposição de prazos de entrega, mas iniciada em coordenação com outras atividades no fluxo de produção, graças ao conhecimento das capacidades reais de produção (ou seja, previsão confiável de *throughput* e tempo de ciclo). Os pedidos relativos às fases de fabricação subsequentes (ou seja, produção de componentes e montagem do produto) podem ser melhor coordenados graças à estimativa confiável desses parâmetros. Essa abordagem apresentada pelos autores vai ao encontro do proposto pelo TPC, ainda que este não seja citado no trabalho.

Também se destacou que as práticas de PCP, qualquer que seja o modelo que as inspire, tendem a se beneficiar da implantação de tecnologias da Indústria 4.0, conforme os dados de produção se tornam mais disponíveis. Além dos dados, os algoritmos de IA podem contribuir para a calibração dos modelos de PCP, em particular, os modelos de produção puxada, que se tornariam mais adaptáveis às incertezas da demanda e da produção. Por meio de sinais eletrônicos transmitidos por IoT, um processo poderia desencadear a produção de outro em uma forma pura do JIT, introduzindo um sistema puxado de fluxo de peça única, também chamado de sincronização autônoma de processos (CHIARINI; KUMAR, 2020). Para outro especialista, estas tecnologias permitem um novo nível de precisão e acurácia nos dados usados para parametrizar inicialmente um sistema baseado em TPC, assim como para seu controle quando em funcionamento. Destaca-se que a busca por altos níveis de precisão não é prioridade na visão de acadêmicos em TOC, visto que pode levar a respostas erradas mais rapidamente (PRETORIUS, 2007). Goldratt (1988) já alertava que usuários de sistemas computadorizados deveriam ser reeducados para focar sua atenção e fornecer dados precisos em pontos selecionados, principalmente com relação ao estoque logo antes dos gargalos, e para rastrear com precisão o estoque que o gargalo já havia processado. Uma discussão sobre a noção errônea de que uma precisão muito alta de dados é necessária em todos os lugares pode ser encontrado em Goldratt (1982).

Este especialista ainda afirma que uma das principais barreiras para a implementação de qualquer abordagem de PCP seria a falta de informação de qualidade e tecnologias da Indústria 4.0 têm o potencial de superar esse problema. Dados de consumo de pulmões e estado da capacidade de cada recurso poderão ser obtidos em tempo real e com confiabilidade. Entretanto, resultados de simulações apontaram que mecanismos de controle de fluxo simplificados (como mecanismos de *feedback* baseado no gargalo) apresentam melhor desempenho do que mecanismos de controle de fluxo

dinâmico (por exemplo, sistemas de programação intensiva de dados em tempo real) (GUPTA, 2003).

Além disso, os gerentes, como todas as pessoas, tendem a sofrer de vieses cognitivos, ou seja, eles tendem a encontrar nos dados aquilo que já sabem (focando em dados que reafirmam crenças), ver padrões inexistentes em dados (devido à ilusão de compreensão), fazer perguntas erradas, ignorar as evidências e superestimar seus conhecimentos (VAN RIJMENAM et al., 2019). Neste sentido, um segundo ponto sobre benefícios da Indústria 4.0 destacado pelo especialista seria a redução do papel humano na manufatura, agora também das suas atividades intelectuais, permitindo aplicar as premissas da TOC sem potenciais vieses cognitivos. Certas premissas da TOC são contraintuitivas e podem acabar sendo contestadas por tomadores de decisões humanos, o que não ocorre com o uso de sistemas totalmente automatizados.

Alguns pontos específicos do TPC também foram citados como potenciais focos de adoção das tecnologias. Um especialista citou que elas seriam aplicáveis especialmente para o mecanismo da corda. Em estudos sobre PCP inteligente, é citado o uso de sistemas ciberfísicos para controle autônomo de produção, o que envolveria a liberação de pedidos para o chão de fábrica (BUENO; GODINHO FILHO; FRANK, 2020). Outro citou que poderiam colaborar para estabelecer a direção para tomada de decisão e para identificação da restrição. Em outra contribuição, foi citado que as tecnologias da quarta revolução suportariam a criação, cálculo e gerenciamento dinâmico do *status* do pulmão, rastreamento de WIP, bem como de outros KPI's associados com o TPC. Em operações mais dinâmicas, por outro lado, podem usar técnicas descentralizadas para despacho e sequenciamento de trabalhos em cada estação de chão de fábrica, usando sistemas ciberfísicos e MES (ROMERO-SILVA; HERNÁNDEZ-LÓPEZ, 2020).

O TPC depende dos pulmões para suavizar a imprevisibilidade no fornecimento de matérias-primas, produção e demandas do mercado, afirma um dos respondentes. O papel de amortecimento de incertezas dos pulmões, bem como da capacidade protetiva é ressaltado em diversas pesquisas (BETTERTON; COX, 2009; GUIDE JR., 1997; KADIPASAOGLU et al., 2000; ROTA; DE SOUZA, 2021). Qualquer tecnologia que reduza a magnitude da imprevisibilidade, por sua vez, diminuiria os tamanhos de pulmão necessários. Pulmões menores significam menos investimentos vinculados ao sistema e um maior retorno sobre o investimento. O objetivo de estabelecer pulmões é certificar-se de que a produção no recurso gargalo não é perturbada pelas variações a



montante e mantém sua alta utilização. Um pulmão extremamente grande aumentará o WIP e estenderá o *lead time* de produção, especialmente em um ambiente com grandes famílias de peças e um longo tempo de processo. Ao contrário, um *buffer* extremamente pequeno reduzirá a capacidade de resistir a perturbações e diminuirá a estabilidade do sistema. A flexibilidade da abordagem da TOC ajuda a lidar com a previsibilidade e garantir pulmões em tamanho adequado (GUAN et al., 2008).

Ademais, um dos participantes afirmou que desde que essas tecnologias proporcionem melhor visibilidade do WIP (em termos de capacidade consumida), pode-se ter informações para tomar melhores decisões no dia a dia sobre o que liberar para o chão de fábrica e qual será a melhor sequência. Esses dados também ajudarão a coletar as causas de atrasos relevantes para que as empresas possam planejar e executar projetos de melhoria reais. Outra citação também afirma que essas tecnologias podem fornecer dados para conduzir um POOGI mais rápido e eficaz. Importante citar um alerta de Goldratt, que afirma que muitos benefícios destacados por fornecedores de tecnologias se referem a características não vinculadas ao ganho, e critica uso de termos como “melhor visibilidade” ou “tomadas de decisão mais ágeis” (GOLDRATT, 2006). A seção 2.2.3. procura explorar mais detalhadamente essa e outras visões da TOC sobre a adoção tecnológica nas organizações.

De forma a resumir os resultados da consulta aos especialistas, as principais opiniões emitidas foram destacadas nos Quadros 12 e 13, que apresentam, respectivamente, resultados esperados, acompanhados das referências que corroboram as opiniões, bem como resultados inesperados, com discussões complementares.

Quadro 12 - Resultados previstos na literatura com relação às opiniões emitidas pelos especialistas na etapa qualitativa

<b>Resultados esperados</b>	<b>Referências</b>
Métodos e princípios da TOC permanecem válidos no contexto da Indústria 4.0.	(GOLDRATT, 2006; SCHRAGENHEIM, 2017)
TOC como orientadora de tomadas de decisão, inclusive sobre a implantação focalizada de tecnologias digitais.	(GOLDRATT, 2002; GOLDRATT; SCHRAGENHEIM; PTAK, 2000)
Benefícios de aplicar o suporte de tecnologias da Indústria 4.0 devem passar por análise financeira, proporcionada pela Contabilidade de Ganhos.	(GARCÍA-VIDAL et al., 2019; GUPTA; ANDERSEN, 2018; SCHRAGENHEIM; CAMP; SURACE, 2019)
O uso de tecnologias deve ser focado nas restrições, evitando soluções excessivamente sofisticadas. Simplicidade é uma marca do TPC e a complexidade trazida pela Indústria 4.0 poderia ser desprezível ou mesmo	(ALMEIDA et al., 2018; BARNARD, 2010; COX; ROBINSON, 2017)

prejudicial.	
Tecnologias como IoT, <i>big data</i> e IA podem suportar atividades do TPC pelo fornecimento de informações em tempo real para controle/monitoramento automatizado do fluxo e sincronização de recursos com o Tambor.	(FOSSO WAMBA et al., 2021; HELO; HAO, 2021)
Sistemas avançados de controle da produção, com uso de sistemas MES/SCADA/ERP inteligentes podem apresentar suporte potencial, pois há aplicações tradicionais em TOC.	(KLOVIENE; UOSYTE, 2019; LEA, 2007; MIRZAEI et al., 2019)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 13 - Resultados inesperados, provenientes das opiniões emitidas pelos especialistas na etapa qualitativa

<b>Resultados surpreendentes</b>	<b>Possíveis explicações e eventuais recomendações para pesquisas futuras</b>
Suporte de tecnologias da Indústria 4.0 para monitoramento do <i>status</i> do pulmão, liberação de material e controle do <i>full kit</i> , rastreamento do WIP e monitoramento do fluxo até o RRC.	A arquitetura provida pelas novas tecnologias é um avanço aos sistemas ERP tradicionais, mantendo atividades como monitoramento de tempo de ciclo e <i>throughput</i> e desenvolvendo a coordenação em tempo real.
Implantação do TPC em etapa manual para, após, avaliar a digitalização. A análise do fluxo global na cadeia de suprimentos precederia a implantação de tecnologias de automação, sensoriamento e de análise de dados.	Foco deveria estar na adoção completa das atividades do TPC/GP e demais princípios da TOC, sendo a adoção de tecnologias de suporte um complemento, não sendo obrigatória.
Potencial de uso da CCPM para gerenciar projetos de implantação de tecnologias da Indústria 4.0.	Tratamento adequado das incertezas e riscos inerentes a projetos inovadores, pelo gerenciamento focado na corrente crítica e controle por GP. Pesquisa futura: Não houve estudo específico da aplicação de CCPM no contexto da Indústria 4.0 e de ambientes VUCA.
Soluções baseadas em <i>machine learning</i> e IA poderiam facilitar a busca por soluções globais.	Maior rapidez na tomada de decisões, apoiada por recursos tecnológicos e focada na identificação e gestão da restrição.
Benefícios seriam mais pronunciados em ambientes de produção ETO.	Vantagens da aplicação de TPC neste tipo de sistema já foi evidenciado, mas fora do contexto do uso de tecnologia, com as da Indústria 4.0 (TELLES et al., 2020).
Há tecnologias que são adotadas em processos de fabricação e teriam menor potencial para atividades de gestão ou de PCP, como as do TPC/GP.	Soluções voltadas à robótica e automação avançadas são de fato voltadas aos processos de fabricação e controle de qualidade. Assim como a impressão 3D, tem uso mais difícil de identificar em atividades gerenciais.
Tecnologias móveis poderiam ser aplicadas para automatizar processos repetitivos, comunicar prioridades imediatas de recursos e melhorar o fluxo geral de informações.	Estas soluções tendem a promover maior facilidade de visualização de dados, sobretudo em projetos. O fluxo de informação é chave para controle do fluxo físico. Pesquisa futura: Buscar casos de uso de tecnologias móveis, por exemplo, em ambientes de projeto (CCPM).
Foi citado o aumento do nível de precisão e confiabilidade proporcionado pelas tecnologias, apesar da literatura em TOC ter ressalvas quanto à busca por soluções ótimas.	Para decisões de mais longo prazo, o uso de <i>big data</i> e técnicas avançadas de previsão podem ser usadas para apoiar decisões intuitivas e complementar os pulmões visuais.
Opiniões aparentemente conflitantes a respeito de vieses gerenciais. Para um especialista, a implantação das tecnologias	Se os algoritmos que suportam as tecnologias da Indústria 4.0 (por exemplo, programação baseada em IA, como o aprendizado por reforço) forem treinados

<p>incorporaria os vieses gerenciais vigentes, preservando os problemas atuais da operação. Para outro, a redução do papel humano no processo decisório eliminaria potenciais vieses, facilitando a adoção de regras contraintuitivas presentes no TPC/GP.</p>	<p>nas regras do TPC/GP, os sistemas inteligentes passariam a tomar decisões de maneira coerente com os princípios e de forma autônoma.</p>
<p>Para alguns especialistas, as tecnologias da Indústria 4.0 não auxiliariam nenhuma atividade do TPC ou mesmo seriam prejudiciais.</p>	<p>As tecnologias tradicionais, como sistemas MES/SCADA/ERP já funcionariam bem, permitindo a coleta e manipulação de dados necessária para o TPC/GP. Dificuldade de identificar qual limitação as tecnologias recentes pretendem remover. Elas incorporariam os vieses gerenciais vigentes, preservando os problemas atuais da operação.</p>

Fonte: Elaborado pelo autor.

A seção seguinte finaliza o trabalho, sintetizando as principais contribuições da pesquisa, bem como discutindo limitações e possibilidades de estudos futuros derivados dos resultados aqui apresentados.

## **6. CONCLUSÕES**

A seção final apresenta uma discussão sobre o atendimento aos objetivos de pesquisa propostos na Introdução (6.1.), elencando contribuições teóricas (6.2.) e gerenciais (6.3.) dos resultados do trabalho. Além disso, pretendeu-se elencar algumas limitações e propostas de pesquisa futura para continuidade dos estudos no tema (6.4.).

### **6.1. ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS DE PESQUISA**

No ambiente de produção atual, em que os tomadores de decisão são apoiados por um processamento rápido de dados em massa, o método TPC/GP ainda apresenta relevância, visto que permite foco para atenção e ação gerenciais, importante habilidade em ambientes complexos e incertos. Para sistemas de produção caracterizados como VUCA, a identificação de restrições pode ser dificultada se baseada somente em métodos analíticos usuais. As tecnologias da Indústria 4.0 apresentam, entre outras características, a sincronização dos sistemas de produção, o uso avançado de dados coletados em tempo real do chão de fábrica e a redução do papel humano na tomada de decisão. Assim, dado o número de variáveis, suas dependências e mudanças ocasionais em ambientes com alta incerteza, abordagens como as do TPC podem requerer suporte tecnológico, o que se pretendeu explorar na presente pesquisa.

O trabalho de pesquisa que originou esta Tese procura iniciar uma discussão mais explícita sobre a entrada da Teoria das Restrições na Quarta Revolução Industrial e as implicações para seus princípios e ferramentas. Como visto na revisão sistemática realizada nos temas TOC e Indústria 4.0, as publicações têm usualmente citado tecnologias isoladas e trabalham a TOC como contextualização ou limitada a aplicações dos 5FS. Por ter sua principal aplicação no PCP, era esperado que os pesquisadores em TOC se voltassem a investigar em que medida as diferentes inovações trazidas nos últimos anos impactariam os métodos TPC e GP.

Por isso, procurou-se focar em um objetivo que representasse uma faceta do tema de integração da TOC à Quarta Revolução: a possibilidade de se aplicar as tecnologias 4.0 nos métodos consagrados TPC e GP. Pode-se afirmar que o trabalho atingiu os objetivos propostos, dado que foi possível estabelecer uma hierarquia dos grupos tecnológicos, por meio da avaliação multicritério realizada por especialistas em TOC. Também foi possível identificar visões da comunidade acadêmica e profissional

acerca dos usos e implicações de algumas das tecnologias avaliadas, identificando oportunidades e riscos.

Além do objetivo geral do trabalho, também foi possível ao longo do processo apresentar contribuições a outros temas relevantes. Por meio da revisão sistemática realizada, foi possível traçar o perfil da pesquisa em TOC e Indústria 4.0, que ainda é incipiente e com baixa integração entre os temas. Os recortes de escopo escolhidos nesta pesquisa foram baseados nestas demandas identificadas nos trabalhos analisados. Também, pela própria natureza do método de decisão multicritério aplicado, foi possível fazer uma análise hierárquica das próprias atividades indicadas pela literatura em TPC/GP. Por fim, promoveu-se uma discussão geral sobre o uso de tecnologias para apoio da TOC em ambientes de incerteza e mudanças rápidas, sob a perspectiva dos princípios que baseiam a teoria.

## 6.2. CONTRIBUIÇÕES TEÓRICAS

As tecnologias voltadas ao controle da produção, como MES/SCADA/ERP, e ao uso da informação, apresentaram maior impacto potencial nas atividades do TPC/GP. Apesar de algumas delas serem tratadas isoladamente em estudos sobre TOC, foi possível fazer uma análise conjunta das atividades com outros grupos mais recentes, o que não havia sido tratado anteriormente.

Tecnologias voltadas à Ciência de Dados e à interação da informação com sistemas físicos, como *big data*, aprendizagem de máquina, IA e IoT tiveram destaque. A análise avançada de dados é uma importante tendência na gestão de operações e os especialistas indicaram que o TPC pode ser dela beneficiado pela maior precisão e eficiência na identificação de restrições e monitoramento do pulmão. Outros benefícios citados pelos especialistas entrevistados foram o fornecimento de informações em tempo real, o controle automatizado do fluxo e a sincronização de recursos com o Tambor. Apesar da discussão se este suporte potencial seria paradoxal, dada a aversão à otimização inerente ao TPC, indicações dadas pelos próprios especialistas apontam que é possível adequar as aplicações à lógica da TOC.

Ainda, tecnologias de computação e manufatura em nuvem tiveram destaque frente a soluções mais consolidadas, como automação, robótica e tecnologias móveis. Estas tecnologias, com menor suporte potencial apontado pelos especialistas, que ainda citaram os sistemas integrados de engenharia e manufatura, têm aplicações mais ligadas

a processos de fabricação, e ainda carecem de investigação no âmbito de PCP. Também, o uso de tecnologias móveis se amplia na gestão da manutenção e da qualidade e pode ser estudado em outras áreas da gestão de operações.

Interessante observar que as tecnologias móveis tiveram algumas opiniões positivas na etapa qualitativa, mas na análise por BWM-TOPSIS apareceu nos últimos lugares. Foi citado o uso potencial na CCPM, o que vale ser estudado futuramente, bem como se há usos práticos em outras aplicações de TOC. Ainda, o uso de soluções remotas e em nuvem é pouco explorado na literatura em TOC e encontrou aqui um resultado motivador, tendo pontuação significativamente superior às anteriormente citadas.

Apesar de alguns resultados encontrarem paralelo com evidências recentes de estudos em *lean manufacturing*, a digitalização do TPC apresenta características particulares. As tecnologias, se aplicadas, serão voltadas a atender o monitoramento do *status* dos pulmões, controlar o fluxo direcionado ao RRC e realizar verificações na disponibilidade de materiais e componentes (*full kitting*).

Além disso, esta pesquisa procurou contribuir para a literatura em TOC, ao propor uma classificação inédita das diversas atividades e ferramentas que compõem o sistema TPC/GP. Esta estrutura amplia o entendimento sobre a priorização atribuída pela comunidade que estuda e aplica TOC para cada componente da abordagem. Destacam-se aqui alguns resultados não discutidos anteriormente na literatura em TOC, como a prevalência da Corda sobre Tambor e Pulmão, e do uso de pulmões para orientar melhorias, frente ao seu uso mais conhecido relacionado à priorização de ordens no chão de fábrica. Outro resultado relevante foi a hegemonia de atividades ligadas ao TPC clássico frente à abordagem simplificada e mais contemporânea do TPC-S.

Uma reflexão que se pode fazer sobre a abordagem aqui apresentada é a do alinhamento conceitual entre o estabelecimento de hierarquias para as diversas atividades do TPC e suas potenciais aplicações tecnológicas e a exploração da restrição de atenção gerencial. A priorização fornecida pela abordagem multicritério é consistente com a noção de uso eficiente do foco dos gestores.

Destaca-se ainda que a escolha por se estabelecer uma hierarquia de critérios foi uma necessidade do método BWM-TOPSIS proposto. Há controvérsias quanto a estabelecer uma classificação de um conjunto de atividades que formariam uma lista fechada, em que todas as etapas seriam necessárias, além de serem altamente

relacionadas entre si. No entanto, além da imposição metodológica, procurou-se avaliar sua importância relativa, sem apontar que determinadas atividades devam ser de fato negligenciadas.

Um ponto bastante discutido entre os especialistas na etapa qualitativa foi a aparente contraposição entre o princípio de simplicidade inerente, que baseia a TOC, e a sofisticação das tecnologias da Indústria 4.0. As soluções 4.0 se caracterizam por um caráter de otimização, sensoriamento detalhado dos recursos e uso massivo de dados. Para a TOC, despende investimento e foco da gestão em todos os pontos, monitorando, coletando dados e agindo sobre cada ponto no sistema pode ser prejudicial. Por outro lado, os sistemas ciberfísicos, simbolizados na tecnologia de IoT, são voltados a conexão entre componentes do sistema, estabelecendo soluções em rede. Essa característica vai ao encontro da visão sistêmica, com foco nos pontos restritivos, o que pode viabilizar este tipo de implementação. Este trabalho procurou trazer luz a essa discussão, mostrando algumas precauções a serem tomadas na aplicação e estudo dessas tecnologias sob o prisma da TOC.

Algumas das tecnologias estudadas complementarizam e não conflitariam, a princípio, com os princípios básicos da TOC. Se fosse desenvolvido um *framework* detalhado, baseado em TOC, com dados estruturados e com relacionamentos de causa e efeito entre métricas financeiras e físicas, poderiam ser estabelecidos modelos matemáticos para realizar análises de sensibilidade e resolver problemas de otimização global. Outras ferramentas da Indústria 4.0, como aprendizado de máquina, por exemplo, também poderiam ajudar a analisar esses modelos. O desafio de desenvolver esse tipo de solução está na incorporação da incerteza nos modelos. A proposta atual do TPC, como visto na seção 2.2.3, gerencia a incerteza sem um viés de otimização, por meio dos pulmões. Essa forma natural de tratar a variabilidade comum e esperada pode ser particularmente difícil de ser reproduzida nos modelos, que muitas vezes exacerbam o impacto da incerteza nos planos, por meio de detalhamento excessivo e proteções individualizadas e disseminadas.

Procurou-se também realizar uma discussão a respeito do papel da TOC na tomada de decisões sob incerteza no contexto da Indústria 4.0, dado que transformar os processos tradicionais para o contexto de digitalização envolve muitos fatores de risco. Além da discussão acerca das estratégias já adotadas com sucesso no TPC para lidar com as variabilidades inerentes ao processo, concluiu-se que uma efetiva identificação e revisão de regras e políticas deve anteceder a aplicação de soluções tecnológicas.

Ademais, o excesso de dados disponíveis pode desviar a atenção dos gerentes, afastando-os de soluções focadas e voltadas à otimização global.

Também foi possível fazer uma discussão mais aprofundada, se comparada com o que há atualmente disponível na literatura acadêmica, com relação a como a TOC compreende a adoção de tecnologias inovadoras. Destaca-se o uso das seis questões tecnológicas e aplicação da lógica de focalização à avaliação e adoção de tecnologias. O valor da implementação está na redução de limitações ao desempenho global do sistema. Se benefícios potenciais, como melhor visualização de dados ou maior precisão nas previsões, não se voltarem a reduzir as restrições do sistema produtivo e, por consequência, permitirem melhorias no desempenho global, eles seriam ilusórios do ponto de vista da TOC e as tecnologias que os promovem não seriam recomendadas.

Por fim, procurou-se contribuir para a literatura em métodos de tomada de decisão multicritério, por meio da apresentação de análise de dados pela integração dos métodos BWM e TOPSIS, com coleta via levantamento tipo *survey*. Normalmente, estudos do tipo AHP-TOPSIS, mais comuns na literatura, consultam pequena amostra de especialistas, de 5 a 10 (EVANS, 2016). Porém, o AHP exige muitas vezes a coleta presencial e muitas rodadas de resposta, de forma a adequar o nível de inconsistência. Aqui, optou-se por utilizar uma abordagem com BWM para cálculo dos pesos, de forma a manter baixa inconsistência mesmo coletando uma amostra numerosa, de forma remota e em apenas uma rodada. Métodos estatísticos usados para tratamento de dados de levantamento, como testes de hipótese, foram aplicados com sucesso a pesos e *scores*, de forma a verificar possíveis empates, algo que também não é usualmente visto em estudos com tomada de decisão multicritério.

### **6.3. CONTRIBUIÇÕES GERENCIAIS**

Por meio da avaliação multicritério, foi possível estabelecer uma hierarquia das atividades de TPC/GP, em cinco níveis de prioridade. Esta classificação pode orientar gestores no processo de implementação daquelas atividades em um sistema de produção, caso seja feita a adoção do TPC e do GP em etapas graduais, mantendo sistemas antigos para suprir as ferramentas não adotadas. Além disso, eventuais melhorias e treinamentos podem também ser feitos seguindo esta ordem de preferência, pois supostamente seria garantida prioridade às atividades mais importantes.



Assim, por exemplo, atividades voltadas à identificação da restrição e controle da liberação de materiais teriam prioridade sobre mudanças na política de lotes da TOC e sobre aplicações complementares dos pulmões, como o gerenciamento de pulmões de capacidade. Como dito anteriormente, parte dos gerentes poderão preferir não seguir essa ordem de priorização, realizando investimentos e focalizando recursos em todas as ferramentas na mesma proporção.

Da mesma forma, chegou-se a uma classificação das tecnologias da Indústria 4.0 aplicadas às atividades do TPC/GP, tratadas aqui em conjunto. Foram identificadas quatro classes com diferenças estatisticamente significativas. O primeiro grupo de tecnologias com maior suporte potencial às atividades de TPC envolve sistemas inteligentes de controle da produção (*smart* MES/SCADA/ERP), aprendizagem de máquina, *big data* e *data analytics*. Assim, o foco tanto de pesquisadores quanto de praticantes poderia ser direcionado a desenvolver soluções baseadas em algoritmos inteligentes, capazes de lidar com grande volume de dados em tempo real e que tomem ações autonomamente, ainda que guiadas pelos mesmos princípios presentes no TPC/GP atual.

Em posição intermediária, estão os grupos que tratam de tecnologias voltadas à simulação de sistemas de produção, ao desenvolvimento de sistemas ciberfísicos e à computação em nuvem. Dentre as tecnologias com bom suporte potencial ao TPC/GP estão o uso de sensoriamento e conexão entre recursos a partir de RFID e IoT, bem como o uso de *digital twins* e realidade virtual/aumentada.

Enfim, o último grupo em termos de suporte potencial inclui dispositivos móveis, como *tablets*, *smartphones* e *smartwatches*, robótica e automação avançada e sistemas integrados de desenvolvimento e fabricação de produtos. A princípio, estas aplicações apresentariam baixa prioridade e poderiam ser desenvolvidas posteriormente, a critério dos gestores. Lembrando que algumas dessas soluções são identificadas com processos de fabricação e ainda não têm implicações claras para o PCP.

Pode-se também citar uma contribuição potencial do estudo aos processos de raciocínio da TOC. A hierarquia de atividades do TPC/GP proposta poderia ser integrada às árvores S&T, de forma a orientar a implantação do método. As S&T recomendam uma sequência de implementação baseada em premissas lógicas, e as tendências consolidadas pelos especialistas na abordagem multicritério podem auxiliar no desenvolvimento da árvore S&T voltada à adoção do TPC/GP e da implantação das tecnologias da Indústria 4.0 para suporte às atividades. A árvore da realidade futura

também poderia ser aplicada para validar a efetividade das mudanças propostas e identificar possíveis efeitos colaterais.

#### **6.4. LIMITAÇÕES DA PESQUISA, LACUNAS DE ESTUDO E PROPOSTA DE AGENDA DE PESQUISA**

Este trabalho tem um caráter exploratório, pois visou identificar tendências com relação às principais atividades de TPC e GP e para o suporte potencial das tecnologias da Indústria 4.0. Dessa forma, uma primeira limitação é o escopo, isto é, aplicações de TOC em atividades de PCP da TOC. Trabalhos futuros poderiam se debruçar em outras áreas focalizadas pela TOC. Dentre as com maior potencial estariam a CCPM, cadeia de suprimentos (*pull system/replenishment*) e contabilidade gerencial (*throughput economics*).

Outra limitação relacionada ao trabalho ser exploratório é a fonte de evidências. Os dados, sejam quantitativos ou qualitativos, foram coletados com uma amostra de especialistas em TOC, entre acadêmicos, consultores e praticantes. Importante frisar que se pretendeu estabelecer uma classificação das tecnologias segundo seu suporte potencial reconhecido pelos especialistas, a partir da aderência dessas soluções às características do sistema TPC/GP. Se essas aplicações seriam viáveis e como seriam implantadas em detalhes deve ser explorado futuramente, em trabalhos empíricos e técnicos. O estudo de casos de digitalização e uso de Ciência de Dados em sistemas gerenciados por TPC, por exemplo, complementariam e ajudariam a explicar as tendências identificadas e as opiniões levantadas pelos respondentes.

Com relação às limitações inerentes ao método, tentou-se utilizar de formas sistemáticas para selecionar os grupos tecnológicos avaliados e utilizou-se da literatura em TOC para selecionar quais atividades seriam alvos de análise. Porém, outras hierarquias, com diferentes critérios e alternativas, poderiam ter sido confeccionadas, alterando a análise. Ainda, sugere-se utilizar abordagens do tipo Fuzzy para inserir o fator de incerteza que os respondentes apresentam em avaliações multicritério. No entanto, a fuzificação pode levar a um nível elevado de empates, reduzindo a diferenciação de pesos e pontuações, o que pode limitar as discussões possíveis. Outros métodos estatísticos e econométricos podem complementar a análise multicritério.

Como visto, tecnologias voltadas à Ciência de Dados e a sistemas de controle avançado da produção tiveram atribuição relativamente maior dada pelos especialistas.

Pesquisas futuras, a partir destes resultados, poderiam focar em estudar soluções baseadas nestes grupos, procurando mensurar seu uso atual, as limitações ao uso e possíveis alterações nas ferramentas propostas pelo TPC/GP devido à presença destas tecnologias. Da mesma forma, outras tecnologias voltadas à digitalização dos processos, como *digital twins*, realidade virtual e aumentada e identificação e rastreamento de materiais ainda não tiveram sua aplicação em PCP devidamente estudadas e poderiam receber atenção de pesquisadores em futuros estudos aplicados.

Ainda, seria importante estudar modelos matemáticos, com aplicações de *big data*, aprendizagem de máquina e inteligência artificial, voltados a melhorar o desempenho do TPC. A modelagem deveria ser totalmente adaptada aos conceitos do TPC, usando métricas da economia de ganhos e subordinada às mudanças na restrição, dando caráter dinâmico ao modelo. A comparação com as heurísticas atuais seria relevante para o próprio debate acerca do uso de soluções sofisticadas.

Outra proposta de pesquisa futura seria a avaliação dos motivos pelos quais algumas tecnologias apresentaram pontuação muito baixa na avaliação dos especialistas. Sugere-se verificar em campo as dificuldades ou mesmo a ineficácia do uso de dispositivos móveis, *softwares* para integração de desenvolvimento e fabricação de produtos e automação para auxiliar o TPC.

Concluindo, algumas críticas à Indústria 4.0, na perspectiva da TOC, citadas por especialistas são importantes e merecem investigação futura: i) sofisticação e otimização excessivas, desnecessárias com o uso das tecnologias de informação atuais; ii) vieses gerenciais presentes nas políticas de PCP, e que limitam que qualquer tecnologia gere todos os seus potenciais benefícios e iii) dificuldade de identificar qual limitação das atividades de TPC e GP as novas soluções suprimem, como na geração de prioridades.

## REFERÊNCIAS

- ABBAS, Z.; YOON, W. A Survey on Energy Conserving Mechanisms for the Internet of Things: Wireless Networking Aspects. **Sensors**, v. 15, n. 10, p. 24818–24847, 2015.
- ABDIRAD, M.; KRISHNAN, K. Industry 4.0 in Logistics and Supply Chain Management: A Systematic Literature Review. **Engineering Management Journal**, v. 00, n. 00, p. 1–15, 13 jul. 2020.
- ABDUL RANI, N. et al. Augmented reality: capabilities and challenges in machining industry aligned with industry 4.0. **Advances in Materials and Processing Technologies**, v. 00, n. 00, p. 1–9, 14 jul. 2020.
- ACETO, G.; PERSICO, V.; PESCAPÉ, A. A Survey on Information and Communication Technologies for Industry 4.0: State-of-the-Art, Taxonomies, Perspectives, and Challenges. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 21, n. 4, p. 3467–3501, 2019.
- ALARCÓN, F.; PEREZ, D.; BOZA, A. USING THE INTERNET OF THINGS IN A PRODUCTION PLANNING CONTEXT. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 13, n. 1, p. 72, mar. 2016.
- ALMADA-LOBO, F. The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES). **Journal of Innovation Management**, v. 3, n. 4, p. 16–21, 24 jan. 2016.
- ALMEIDA, G. V. DE et al. Fundamental principles of the Toyota Way and the Theory of Constraints: comparative analysis and synthesis. **International Journal of Services and Operations Management**, v. 30, n. 1, p. 51, 2018.
- ALVAREZ-DE-LOS-MOZOS, E.; RENTERIA, A. Collaborative Robots in e-waste Management. **Procedia Manufacturing**, v. 11, n. June, p. 55–62, 2017.
- APAOLAZA, U.; LIZARRALDE, A. Managing multiple projects in uncertain contexts: A case study on the application of a new approach based on the critical chain method. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 15, 2020.
- APAOLAZA, U.; LIZARRALDE, A.; OYARBIDE-ZUBILLAGA, A. Modern Project Management Approaches in Uncertainty Environments: A Comparative Study Based on Action Research. **Sustainability**, v. 12, n. 24, p. 10542, 16 dez. 2020.
- ARCIDIACONO, G.; PIERONI, A. The Revolution Lean Six Sigma 4.0. **International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology**, v. 8, n. 1, p. 141, 2018.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, nov. 2017.
- ARNOLD, C.; VOIGT, K. Determinants of Industrial Internet of Things Adoption in German Manufacturing Companies. **International Journal of Innovation and Technology Management**, v. 16, n. 06, p. 1950038, 3 out. 2019.
- ATWATER, J. B.; CHAKRAVORTY, S. S. A study of the utilization of capacity constrained resources in drum-buffer-rope systems. **Production and Operations Management**, v. 11, n. 2, p. 259–273, 2002.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The Internet of Things: A survey. **Computer Networks**, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010.
- BACELAR-SILVA, G. M.; COX, J. F.; RODRIGUES, P. P. Outcomes of managing healthcare services using the Theory of Constraints: A systematic review. **Health Systems**, v. 00, n. 00, p. 1–16, 6 out. 2020.
- BADRI AHMADI, H.; KUSI-SARPOG, S.; REZAEI, J. Assessing the social sustainability of supply chains using Best Worst Method. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 126, n. May, p. 99–106, nov. 2017.
- BALAJI, V. et al. Smart manufacturing through sensor based efficiency monitoring system (SBEMS). **Advances in Intelligent Systems and Computing**, v. 614, p. 34–43, 2018.
- BALAJI, V.; VENKUMAR, P.; SABITHA, M. S. Smart Manufacturing through TOC based Efficiency Monitoring System (TBEMS). **International Journal of Engineering & Technology**, v. 7, n. 4.10, p. 118, 2 out. 2018.
- BARATA, J.; RUPINO DA CUNHA, P.; STAL, J. Mobile supply chain management in the Industry 4.0 era. **Journal of Enterprise Information Management**, v. 31, n. 1, p. 173–192, 12 fev. 2018.
- BARNARD, A. Continuous Improvement and Auditing. In: COX III, J. F.; SCHLEIER JR., J. G. (Eds.). **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010. p. 403–454.
- BARNARD, A.; SCHRAGENHEIM, E. **From a TOC perspective: Paying tribute to a Great Pragmatic Thinker**, 2016.
- BARTODZIEJ, C. J. **The Concept Industry 4.0**. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- BAVEJA, A.; KAPOOR, A.; MELAMED, B. Stopping Covid-19: A pandemic-management service value chain approach. **Annals of Operations Research**, v. 289, n. 2, p. 173–184, 14 jun. 2020.
- BEN-DAYA, M.; HASSINI, E.; BAHROUN, Z. Internet of things and supply chain management: a

- literature review. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 15–16, p. 4719–4742, 29 ago. 2019.
- BENDUL, J. C.; BLUNCK, H. The design space of production planning and control for industry 4.0. **Computers in Industry**, v. 105, p. 260–272, 2019.
- BENITEZ, G. B.; AYALA, N. F.; FRANK, A. G. Industry 4.0 innovation ecosystems: An evolutionary perspective on value cocreation. **International Journal of Production Economics**, v. 228, n. March, 2020.
- BENNETT, N.; LEMOINE, G. J. What a difference a word makes: Understanding threats to performance in a VUCA world. **Business Horizons**, v. 57, n. 3, p. 311–317, 2014.
- BENTON, W. C.; SHIN, H. Manufacturing planning and control: The evolution of MRP and JIT integration. **European Journal of Operational Research**, v. 110, p. 411–440, 1998.
- BERTOLINI, M. et al. A meta-analysis of industry 4.0-related technologies that are suitable for lean manufacturing. **Proceedings of the Summer School Francesco Turco**, v. 1, n. November, p. 150–156, 2019.
- BETTERTON, C. E.; COX, J. F. Espoused drum-buffer-rope flow control in serial lines: A comparative study of simulation models. **International Journal of Production Economics**, v. 117, n. 1, p. 66–79, 2009.
- BETZ JR, H. J. Common sense manufacturing, a method of production control. **Production and Inventory Management Journal**, v. 37, n. 1, p. 77, 1996.
- BHARDWAJ, A.; GUPTA, A.; KANDA, A. Drum-Buffer-Rope: The Technique to Plan and Control the Production Using Theory of Constraints. **International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering**, v. 4, n. 9, p. 784–787, 2010.
- BHATTACHARYA, A. et al. A fully fuzzified, intelligent theory-of-constraints product-mix decision. **International Journal of Production Research**, v. 46, n. 3, p. 789–815, 2008.
- BIEL, K.; GLOCK, C. H. Governing the dynamics of multi-stage production systems subject to learning and forgetting effects: A simulation study. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 10, p. 3439–3461, 19 maio 2018.
- BIENHAUS, F.; HADDUD, A. Procurement 4.0: factors influencing the digitisation of procurement and supply chains. **Business Process Management Journal**, v. 24, n. 4, p. 965–984, 2018.
- BISOGNO, S. et al. Theory of constraints applied to scheduled and unscheduled patient flows: Does it improve process performance? **International Journal of Services and Operations Management**, v. 26, n. 3, p. 365–385, 2017.
- BLACKSTONE, J. H. Theory of constraints - A status report. **International Journal of Production Research**, v. 39, n. 6, p. 1053–1080, 2001.
- BLACKSTONE, J. H. A review of literature on drum-buffer-rope, buffer management and distribution. In: COX III, J. F.; SCHLEIER JR., J. G. (Eds.). . **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010. p. 145–173.
- BLACKSTONE, J. H.; COX, J. F. Designing unbalanced lines - Understanding protective capacity and protective inventory. **Production Planning and Control**, v. 13, n. 4, p. 416–423, 2002.
- BLACKSTONE, J. H.; COX, J. F.; SCHLEIER, J. G. A tutorial on project management from a theory of constraints perspective. **International Journal of Production Research**, v. 47, n. 24, p. 7029–7046, 2009.
- BLACKSTONE, J. H.; GARDINER, L. R.; GARDINER, S. C. A framework for the systemic control of organizations. **International Journal of Production Research**, v. 35, n. 3, p. 597–609, 1997.
- BOKRANTZ, J. et al. Smart Maintenance: an empirically grounded conceptualization. **International Journal of Production Economics**, v. 223, n. February, p. 107534, maio 2020.
- BOLLAPRAGADA, R.; SADEH, N. M. An empirical study of policies to integrate reactive scheduling and control in just-in-time job shop environments. **International Journal of Production Research**, v. 42, n. 4, p. 693–718, 2004.
- BONGOMIN, O. et al. Exponential Disruptive Technologies and the Required Skills of Industry 4.0. **Journal of Engineering (United Kingdom)**, v. 2020, 2020.
- BORGHETTI, M. et al. Future Sensors for Smart Objects by Printing Technologies in Industry 4.0 Scenario. **Energies**, v. 13, n. 22, p. 5916, nov. 2020.
- BOUTELLIER, R.; LOFFLER, K. **Bottleneck Technologies: Applying the Constraints Approach to Technology Management Evidence from Case Studies**. 2006 Technology Management for the Global Future - PICMET 2006 Conference. **Anais...IEEE**, jul. 2006Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4077368/>>
- BRINCH, M. Understanding the value of big data in supply chain management and its business processes: Towards a conceptual framework. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 38, n. 7, 2018.

- BUENO, A.; GODINHO FILHO, M.; FRANK, A. G. Smart production planning and control in the Industry 4.0 context: A systematic literature review. **Computers and Industrial Engineering**, v. 149, n. August, p. 106774, 2020.
- BUER, S. V.; STRANDHAGEN, J. O.; CHAN, F. T. S. The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda. **International Journal of Production Research**, v. 7543, p. 1–17, 2018.
- BUESTÁN BENAVIDES, M.; VAN LANDEGHEM, H. Implementation of S-DBR in four manufacturing SMEs: a research case study. **Production Planning & Control**, v. 26, n. 13, p. 1110–1127, 2015.
- C. GARDINER, S.; H. BLACKSTONE JR, J.; R. GARDINER, L. Drum-Buffer-Rope and Buffer Management: Impact on Production Management Study and Practices. **International Journal of Operations & Production Management**, 1993.
- CABEÇAS, A.; MARQUES DA SILVA, M. Project Management in the Fourth Industrial Revolution. **TECHNO REVIEW. International Technology, Science and Society Review**, v. 9, n. 2, p. 79–96, jan. 2021.
- CARMIGNIANI, J. et al. Augmented reality technologies, systems and applications. **Multimedia Tools and Applications**, v. 51, n. 1, p. 341–377, 2011.
- CASTRO, R. F.; GODINHO-FILHO, M.; TAVARES-NETO, R. F. Dispatching method based on particle swarm optimization for make-to-availability. **Journal of Intelligent Manufacturing**, n. 2014, 22 nov. 2020.
- CERUTI, A. et al. Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 6, n. 4, p. 516–526, 2019.
- CHAKRAVORTY, S. S. An evaluation of the DBR control mechanism in a job shop environment. **Omega**, v. 29, n. 4, p. 335–342, ago. 2001.
- CHAKRAVORTY, S. S.; ATWATER, J. B. The impact of free goods on the performance of drum-buffer-rope scheduling systems. **International Journal of Production Economics**, v. 95, n. 3, p. 347–357, mar. 2005.
- CHAKRAVORTY, S. S.; ATWATER, J. B. Bottleneck management: Theory and practice. **Production Planning and Control**, v. 17, n. 5, p. 441–447, 2006.
- CHAKRAVORTY, S. S.; HALES, D. N. Improving labour relations performance using a Simplified Drum Buffer Rope (S-DBR) technique. **Production Planning and Control**, v. 27, n. 2, p. 102–113, 2016.
- CHANG, K. H.; CHANG, Y. C.; CHANG, Y. S. Applying theory of constraints-based approach to solve memory allocation of cloud storage. **International Journal of Systems Science: Operations and Logistics**, v. 4, n. 4, p. 311–329, 2017.
- CHAO, C. C.; YANG, J. M.; JEN, W. Y. Determining technology trends and forecasts of RFID by a historical review and bibliometric analysis from 1991 to 2005. **Technovation**, v. 27, n. 5, p. 268–279, 2007.
- CHAUHAN, A.; SINGH, A. A hybrid multi-criteria decision making method approach for selecting a sustainable location of healthcare waste disposal facility. **Journal of Cleaner Production**, v. 139, p. 1001–1010, dez. 2016.
- CHEHBI-GAMOURA, S. et al. Insights from big Data Analytics in supply chain management: an all-inclusive literature review using the SCOR model. **Production Planning & Control**, v. 31, n. 5, p. 355–382, 3 abr. 2020.
- CHEN, J.; WANG, J.-Q.; DU, X.-Y. Shifting bottleneck-driven TOCh for solving product mix problems. **International Journal of Production Research**, v. 0, n. 0, p. 1–20, 4 ago. 2020.
- CHEN, S.-J.; HWANG, C.-L. **Fuzzy Multiple Attribute Decision Making**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1992. v. 375
- CHENG, E. W. L.; LI, H. Construction Partnering Process and Associated Critical Success Factors: Quantitative Investigation. **Journal of Management in Engineering**, v. 18, n. 4, p. 194–202, out. 2002.
- CHIARINI, A.; KUMAR, M. Lean Six Sigma and Industry 4.0 integration for Operational Excellence: evidence from Italian manufacturing companies. **Production Planning and Control**, v. 0, n. 0, p. 1–18, 2020.
- CHOE, K.; HERMAN, S. Using theory of constraints tools to manage organizational change: a case study of Euripa Labs. **International Journal of Management & organizational behavior**, v. 8, n. 6, p. 540–558, 2004.
- CHOU, H.-H.; WANG, C.-T.; SHEU, R.-S. A practical multiple-tool-set approach for increasing agile response in overhaul production with limited resource requirement visibility. **International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice**, v. 23, n. 2, 2016.

- CHUA, D. K. H.; SHEN, L. J.; BOK, S. H. Constraint-Based Planning with Integrated Production Scheduler over Internet. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 129, n. 3, p. 293–301, jun. 2003.
- CHUNG-HAO HUANG et al. Real-Time RFID Indoor Positioning System Based on Kalman-Filter Drift Removal and Heron-Bilateration Location Estimation. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 64, n. 3, p. 728–739, mar. 2015.
- CIANO, M. P. et al. One-to-one relationships between Industry 4.0 technologies and Lean Production techniques: a multiple case study. **International Journal of Production Research**, v. 59, n. 5, p. 1386–1410, 4 mar. 2021.
- CIECHANSKA, O.; SZWED, C. Characteristics and study of make-to-stock and make-to-availability production strategy using simulation modelling. **Management and Production Engineering Review**, v. 11, n. 4, p. 68–80, 2020.
- CIOFFI, R. et al. Artificial Intelligence and Machine Learning Applications in Smart Production: Progress, Trends, and Directions. **Sustainability**, v. 12, n. 2, p. 492, jan. 2020.
- COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. 2. ed. [s.l.] Academic Press, 1988.
- COHEN, Y. et al. Assembly systems in Industry 4.0 era: a road map to understand Assembly 4.0. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 9, p. 4037–4054, 5 dez. 2019.
- COMAN, A.; RONEN, B. Information technology in operations management: A theory-of-constraints approach. **International Journal of Production Research**, v. 33, n. 5, p. 1403–1415, 1995.
- CONOVER, W. J.; IMAN, R. L. On multiple-comparisons procedures. **Los Alamos Sci. Lab. Tech. Rep. LA-7677-MS**, p. 1–14, 1979.
- CORRÊA, J. S.; SAMPAIO, M.; BARROS, R. DE C. An exploratory study on emerging technologies applied to logistics 4.0. **Gestão & Produção**, v. 27, n. 3, 2020.
- COSTA, D. et al. Analysis of production activity control mechanisms for Industry 4.0. **International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics**, n. 5, p. 194–205, 2019.
- COTTYN, J. et al. A method to align a manufacturing execution system with Lean objectives. **International Journal of Production Research**, v. 49, n. 14, p. 4397–4413, 2011.
- COX, J. et al. The TOCICO Dictionary. p. 1–135, 2012.
- COX, J. F. Using the theory of constraints' processes of ongoing improvement to address the provider appointment scheduling system execution problem. **Health Systems**, v. 00, n. 00, p. 1–32, 2019.
- COX, J. F.; ROBINSON, E. G. Applying goldratts thinking processes to prevent mistakes. **Human Systems Management**, v. 36, n. 4, p. 315–340, 2017.
- COX, J. F.; SCHLEIER, J. G. **Theory of Constraints Handbook**. [s.l.] McGraw-Hil, 2010.
- CRUZ-NEIRA, C.; FERNÁNDEZ, M.; PORTALÉS, C. Virtual Reality and Games. **Multimodal Technologies and Interaction**, v. 2, n. 1, p. 8, 2018.
- CUI, Y.; KARA, S.; CHAN, K. C. Manufacturing big data ecosystem: A systematic literature review. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 62, n. September 2019, p. 101861, 2020.
- DA SILVA STEFANO, G. et al. Identifying Constraints to Increase the Resilience of Cities: A Case Study of the City of Porto Alegre. **Journal of Homeland Security and Emergency Management**, v. 14, n. 4, p. 1–24, 2017.
- DALENOGARE, L. S. et al. The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. **International Journal of Production Economics**, v. 204, n. December 2017, p. 383–394, 2018.
- DALMARCO, G. et al. Providing industry 4.0 technologies: The case of a production technology cluster. **Journal of High Technology Management Research**, v. 30, n. 2, p. 100355, 2019.
- DAMIANI, L. et al. Augmented and virtual reality applications in industrial systems: A qualitative review towards the industry 4.0 era. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 11, p. 624–630, 2018.
- DE CAMARGO FIORINI, P. et al. Management theory and big data literature: From a review to a research agenda. **International Journal of Information Management**, v. 43, n. May, p. 112–129, 2018.
- DE JESUS PACHECO, D. A.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V.; DE MATOS, C. A. The constraints of theory: What is the impact of the Theory of Constraints on operations strategy? **International Journal of Production Economics**, n. Iii, p. 107955, nov. 2020.
- DE MIRANDA, S. S. F. et al. Life cycle engineering 4.0: A proposal to conceive manufacturing systems for industry 4.0 centred on the human factor (DfHFinI4.0). **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 13, 2020.
- DE PAULA FERREIRA, W.; ARMELLINI, F.; DE SANTA-EULALIA, L. A. Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. **Computers and Industrial Engineering**, v. 149, n. January, p. 106868, 2020a.
- DE PAULA FERREIRA, W.; ARMELLINI, F.; DE SANTA-EULALIA, L. A. Simulation in industry

- 4.0: A state-of-the-art review. **Computers and Industrial Engineering**, v. 149, n. January, p. 106868, 2020b.
- DEL CERRO VELÁZQUEZ, F.; MORALES MÉNDEZ, G. Augmented Reality and Mobile Devices: A Binominal Methodological Resource for Inclusive Education (SDG 4). An Example in Secondary Education. **Sustainability**, v. 10, n. 10, p. 3446, 27 set. 2018.
- DENG, F. et al. A BWM-TOPSIS Hazardous Waste Inventory Safety Risk Evaluation. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 16, p. 5765, 10 ago. 2020.
- DEV, N. K.; SHANKAR, R.; QAISER, F. H. Industry 4.0 and circular economy: Operational excellence for sustainable reverse supply chain performance. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 153, n. November 2019, p. 104583, 2020.
- DEV, N. K.; SHANKAR, R.; SWAMI, S. Diffusion of green products in industry 4.0: Reverse logistics issues during design of inventory and production planning system. **International Journal of Production Economics**, n. October, p. 107519, out. 2019.
- DEY, S. et al. FoodSQRBlock: Digitizing Food Production and the Supply Chain with Blockchain and QR Code in the Cloud. **Sustainability**, v. 13, n. 6, p. 3486, mar. 2021.
- DING, B. Pharma Industry 4.0: Literature review and research opportunities in sustainable pharmaceutical supply chains. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 119, p. 115–130, 2018.
- DOLGUI, A. et al. Scheduling in production, supply chain and Industry 4.0 systems by optimal control: fundamentals, state-of-the-art and applications. **International Journal of Production Research**, p. 1–22, 2018.
- DOLGUI, A. et al. Blockchain-oriented dynamic modelling of smart contract design and execution in the supply chain. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 7, p. 2184–2199, 2 abr. 2020.
- DUAN, L.; XIONG, Y. Big data analytics and business analytics. **Journal of Management Analytics**, v. 2, n. 1, p. 1–21, jan. 2015.
- DUBEY, R. et al. Big data analytics and artificial intelligence pathway to operational performance under the effects of entrepreneurial orientation and environmental dynamism: A study of manufacturing organisations. **International Journal of Production Economics**, n. December, p. 107599, dez. 2019.
- DUGDALE, D.; JONES, T. C. THROUGHPUT ACCOUNTING: TRANSFORMING PRACTICES? **The British Accounting Review**, v. 30, n. 3, p. 203–220, set. 1998.
- DUNKE, F. et al. Time traps in supply chains: Is optimal still good enough? **European Journal of Operational Research**, v. 264, n. 3, p. 813–829, fev. 2018.
- EGGER, J.; MASOOD, T. Augmented reality in support of intelligent manufacturing – A systematic literature review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 140, n. December 2019, p. 106195, fev. 2020.
- EHRET, M.; WIRTZ, J.; EHRET, M. Unlocking value from machines : business models and the industrial internet of things industrial internet of things. **Journal of Marketing Management**, v. 00, n. 00, p. 1–20, 2016.
- EIDELWEIN, F. et al. Exploratory Analysis of Modularization Strategy Based on the Theory of Constraints Thinking Process. **Global Journal of Flexible Systems Management**, v. 19, n. 2, p. 111–122, 30 jun. 2018.
- ELBASANI, E.; SIRIPORN, P.; CHOI, J. S. A Survey on RFID in Industry 4.0. In: **Internet of Things for Industry 4.0**. [s.l.: s.n.]. p. 1–16.
- EVANS, G. W. **Multiple Criteria Decision Analysis for Industrial Engineering**. Boca Raton : Taylor & Francis, a CRC title, part of the Taylor & Francis imprint, a member of the Taylor & Francis Group, the academic division of T&F Informa, plc, [2016] | Series: Operations research series; 12: CRC Press, 2016.
- FAN, J.-P.; GUO, Z.-W.; WU, M.-Q. An Improvement of DEA Cross-Efficiency Aggregation Based on BWM-TOPSIS. **IEEE Access**, v. 8, p. 37334–37342, 2020.
- FARKAS, S. B. **Theory of Constraints meets Big Data**. [s.l.: s.n.].
- FATORACHIAN, H.; KAZEMI, H. A critical investigation of Industry 4.0 in manufacturing: theoretical operationalisation framework. **Production Planning & Control**, v. 29, n. 8, p. 633–644, 11 jun. 2018.
- FATORACHIAN, H.; KAZEMI, H. Impact of Industry 4.0 on supply chain performance. **Production Planning and Control**, v. 0, n. 0, p. 1–19, 2020.
- FLOYD, B. D.; RONEN, B. **Office Automation: A Management by Constraints Approach**: NYU Working Paper No. IS-89-020, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=1289686>. New York, NY, USA: [s.n.].
- FORMAN, E. H.; GASS, S. I. The Analytic Hierarchy Process—An Exposition. **Operations Research**, v. 49, n. 4, p. 469–486, ago. 2001.
- FOSSO WAMBA, S. et al. Industry experiences of artificial intelligence (AI): benefits and challenges in operations and supply chain management. **Production Planning & Control**, v. 0, n. 0, p. 1–13, 2021.



- FRANEK, J.; KRESTA, A. Judgment Scales and Consistency Measure in AHP. **Procedia Economics and Finance**, v. 12, n. March, p. 164–173, 2014.
- FRANK, A. G.; DALENOGARE, L. S.; AYALA, N. F. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. **International Journal of Production Economics**, v. 210, n. January, p. 15–26, 2019.
- FREDRIKSSON, C. Big data creating new knowledge as support in decision-making: practical examples of big data use and consequences of using big data as decision support. **Journal of Decision Systems**, v. 27, n. 1, p. 1–18, 2018.
- FRIEDMAN, M. The Use of Ranks to Avoid the Assumption of Normality Implicit in the Analysis of Variance. **Journal of the American Statistical Association**, v. 32, n. 200, p. 675–701, dez. 1937.
- FURHT, B. Cloud Computing Fundamentals. In: **Handbook of Cloud Computing**. Boston, MA, MA: Springer US, 2010. p. 3–19.
- GALATI, F.; BIGLIARDI, B. Industry 4.0: Emerging themes and future research avenues using a text mining approach. **Computers in Industry**, v. 109, p. 100–113, 2019.
- GALBRAITH, J. R. Organization Design: An Information Processing View. **Interfaces**, v. 4, n. 3, p. 28–36, 1974.
- GALLI, B. J. What Human Resource Management Can Teach The Goal. **International Journal of Service Science, Management, Engineering, and Technology**, v. 9, n. 4, p. 26–36, 2018.
- GARCÍA-VIDAL, G. et al. Chain substitution and successive approximation method: Throughput analysis at SMEs. **International Journal of Engineering Business Management**, v. 11, p. 1–12, 2019.
- GEORGE, G.; HAAS, M. R.; PENTLAND, A. Big Data and Management. **Academy of Management Journal**, v. 57, n. 2, p. 321–326, 2014.
- GHOBAKHLOO, M. The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 29, n. 6, p. 910–936, 13 jul. 2018.
- GHOBAKHLOO, M.; CHING, N. T. Adoption of digital technologies of smart manufacturing in SMEs. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 16, n. October, p. 100107, 2019.
- GIANNETTI, C.; RANSING, R. S. Risk based uncertainty quantification to improve robustness of manufacturing operations. **Computers and Industrial Engineering**, v. 101, p. 70–80, 2016.
- GODINHO FILHO, M.; BARCO, C. The effect of transfer lot size on manufacturing lead time: a stochastic analysis. **European J. of Industrial Engineering**, v. 15, n. 6, p. 1, 2021.
- GOLDRATT, E. **The power of technology**. [s.l.] Goldratt Consulting, 2006.
- GOLDRATT, E. M. **100% data accuracy - need or myth?** Proceedings of 25th APICS Conference. Anais...Falls Church, VA: American Production and Inventory Control Society, 1982
- GOLDRATT, E. M. Computerized shop floor scheduling. **International Journal of Production Research**, v. 26, n. 3, p. 443–455, 1988.
- GOLDRATT, E. M. **Haystack syndrome**. [s.l.] North River Press, 1990.
- GOLDRATT, E. M. **Critical Chain**. 1. ed. Great Barrington: North River Press, 1997.
- GOLDRATT, E. M. N&S SERIES - 1. THE REASON FOR TECHNOLOGY. In: **NECESSARY & SUFFICIENT SERIES**. [s.l.] Goldratt Marketing, 2002.
- GOLDRATT, E. M. Standing on the Shoulders of Giants. Production concepts versus production applications. The Hitachi Tool Engineering example. **Gest. Prod.**, v. 16, n. 3, p. 333–343, 2009.
- GOLDRATT, E. M.; COX, J. **The Goal**. Croton-on-Hudson, NY: North River Press, 1990.
- GOLDRATT, E. M. R. E. F.; GRASMAN, G. **The race**. Croton-on-Hudson, NY: North River Press, 1986.
- GOLDRATT, E. M.; SCHRAGENHEIM, E.; PTAK, C. A. **Necessária, sim, mas não suficiente**. Great Barrington: North River Press, 2000.
- GOLMOHAMMADI, D. A study of scheduling under the theory of constraints. **International Journal of Production Economics**, v. 165, p. 38–50, 2015.
- GÓMEZ PAREDES, F. J. et al. Factors for choosing production control systems in make-to-order shops: a systematic literature review. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 7 out. 2020.
- GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, G.; GONZALEZ-CAVA, J. M.; MÉNDEZ PÉREZ, J. A. An intelligent decision support system for production planning based on machine learning. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 31, n. 5, p. 1257–1273, 7 jun. 2020.
- GORECKY, D. et al. **Human-machine-interaction in the industry 4.0 era**. 2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Anais...IEEE, jul. 2014Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6945523/>>
- GRASSI, A. et al. A semi-heterarchical production control architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 24, p. 43–46, abr. 2020.
- GROOP, J.; REIJONSAARI, K.; LILLRANK, P. Applying the theory of constraints to health technology assessment. **International Journal on Advances in Life Sciences**, v. 2, n. 3–4, p. 115–124, 2010.

- GROŠELJ, P. et al. Comparison of some aggregation techniques using group analytic hierarchy process. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 4, p. 2198–2204, mar. 2015.
- GUAN, Z. et al. Operation and control of flow manufacturing based on constraints management for high-mix/low-volume production. **Frontiers of Mechanical Engineering in China**, v. 3, n. 4, p. 454–461, 1 dez. 2008.
- GUIDE, JR., V. D. R. Scheduling using drum-buffer-rope in a remanufacturing environment. **International Journal of Production Research**, v. 34, n. 4, p. 1081–1091, 25 abr. 1996.
- GUIDE JR., V. D. R. Scheduling with priority dispatching rules and drum-buffer-rope in a recoverable manufacturing system. **International Journal of Production Economics**, v. 53, n. 1, p. 101–116, 1997.
- GUIDE, V. D. R. A Simulation Model of Drum-Buffer-Rope for Production Planning and Control at a Naval Aviation Depot. **Simulation**, v. 65, n. 3, p. 157–168, 1995.
- GUNASEKARAN, A. et al. Agile manufacturing practices: the role of big data and business analytics with multiple case studies. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 1–2, p. 385–397, 17 jan. 2018.
- GUPTA, A.; BHARDWAJ, A.; KANDA, A. Theory of constraints- lessons for academicians and practicing managers from “the goal - II”. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 75, 2011.
- GUPTA, H. et al. Enablers to supply chain performance on the basis of digitization technologies. **Industrial Management & Data Systems**, v. ahead-of-p, n. ahead-of-print, 11 nov. 2020.
- GUPTA, H.; BARUA, M. K. Supplier selection among SMEs on the basis of their green innovation ability using BWM and fuzzy TOPSIS. **Journal of Cleaner Production**, v. 152, p. 242–258, 2017.
- GUPTA, M. Constraints management - Recent advances and practices. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 4, p. 647–659, 2003.
- GUPTA, M. et al. Improving the weakest link: A TOC-based framework for small businesses. **Total Quality Management & Business Excellence**, v. 21, n. 8, p. 863–883, ago. 2010.
- GUPTA, M.; ANDERSEN, S. Throughput/inventory dollar-days: TOC-based measures for supply chain collaboration. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 13, p. 4659–4675, 2018.
- GUPTA, M.; BOYD, L.; KUZMITS, F. The evaporating cloud: a tool for resolving workplace conflict. **International Journal of Conflict Management**, v. 22, n. 4, p. 394–412, 2011.
- GUPTA, M. C.; BOYD, L. H. Theory of constraints: a theory for operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 28, n. 10, p. 991–1012, 2008.
- GUPTA, M.; KO, H. J.; MIN, H. TOC-based performance measures and five focusing steps in a job-shop manufacturing environment. **International Journal of Production Research**, v. 40, n. 4, p. 907–930, 2002.
- GUPTA, S.; MODGIL, S.; GUNASEKARAN, A. Big data in lean six sigma: a review and further research directions. **International Journal of Production Research**, 2019.
- HABERLI, C.; OLIVEIRA, T.; YANAZE, M. The adoption stages (Evaluation, Adoption, and Routinisation) of ERP systems with business analytics functionality in the context of farms. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 156, n. January 2018, p. 334–348, 2019.
- HADAS, L.; CYPLIK, P.; FERTSCH, M. Method of buffering critical resources in make-to-order shop floor control in manufacturing complex products. **International Journal of Production Research**, v. 47, n. 8, p. 2125–2139, 2009.
- HANSEN, E. B.; BØGH, S. Artificial intelligence and internet of things in small and medium-sized enterprises: A survey. **Journal of Manufacturing Systems**, n. October 2019, ago. 2020.
- HAO, Y.; HELO, P.; GUNASEKARAN, A. Cloud platforms for remote monitoring system: a comparative case study. **Production Planning and Control**, v. 31, n. 2–3, p. 186–202, 2020.
- HARTMANN, L. et al. Value stream method 4.0: Holistic method to analyse and design value streams in the digital age. **Procedia CIRP**, v. 78, p. 249–254, 2018.
- HAVARD, V. et al. A use case study comparing augmented reality (AR) and electronic document-based maintenance instructions considering tasks complexity and operator competency level. **Virtual Reality**, 26 fev. 2021.
- HELO, P.; HAO, Y. Artificial intelligence in operations management and supply chain management: an exploratory case study. **Production Planning & Control**, v. 0, n. 0, p. 1–18, 1 abr. 2021.
- HENDERSON, S.; FEINER, S. Exploring the Benefits of Augmented Reality Documentation for Maintenance and Repair. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 17, n. 10, p. 1355–1368, 2011.
- HILMOLA, O.-P. Transfer batch sizes and the financial performance of manufacturing? theory of constraints perspective. **International Journal of Manufacturing Technology and Management**, v. 6, n. 1/2, p. 125, 2004.
- HILMOLA, O. P.; GUPTA, M. Throughput accounting and performance of a manufacturing company

under stochastic demand and scrap rates. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 22, p. 8423–8431, 2015.

HINCKELDEYN, J. et al. Expanding bottleneck management from manufacturing to product design and engineering processes. **Computers & Industrial Engineering**, v. 76, p. 415–428, 2014.

HOFMANN, E. Big data and supply chain decisions: the impact of volume, variety and velocity properties on the bullwhip effect. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 17, p. 5108–5126, 2017.

HOFMANN, E.; RÜSCH, M. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. **Computers in Industry**, v. 89, p. 23–34, 2017.

HORVÁTH, D.; SZABÓ, R. Z. Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities? **Technological Forecasting and Social Change**, v. 146, n. October 2018, p. 119–132, 2019.

HUANG, H.-H. Integrated Production Model in Agile Manufacturing Systems. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 20, n. 7, p. 515–525, 9 set. 2002.

HUANG, S. H. et al. Manufacturing system modeling for productivity improvement. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 21, n. 4, p. 249–259, jan. 2002.

HUSEN, Y. A.; KOMARUDIN. **Integration of Lean Manufacturing and Industry 4.0**. Proceedings of the 3rd Asia Pacific Conference on Research in Industrial and Systems Engineering 2020. **Anais...**New York, NY, USA: ACM, 16 jun. 2020Disponível em: <<https://dl.acm.org/doi/10.1145/3400934.3400984>>

HWANG, C.-L.; YOON, K. **Multiple Attribute Decision Making**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981. v. 186

IKEZIRI, L. M. et al. Theory of constraints: review and bibliometric analysis. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 15–16, p. 5068–5102, 29 ago. 2019.

IRANMANESH, H.; MANSOURIAN, F.; KOUCHAKI, S. Critical chain scheduling: A new approach for feeding buffer sizing. **International Journal of Operational Research**, v. 25, n. 1, p. 114–130, 2016.

ISHIZAKA, A.; LABIB, A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 11, p. 14336–14345, maio 2011.

ISHIZAKA, A.; SIRAJ, S. Are multi-criteria decision-making tools useful? An experimental comparative study of three methods. **European Journal of Operational Research**, v. 264, n. 2, p. 462–471, jan. 2018.

IVANOV, D. et al. Researchers' perspectives on Industry 4.0: multi-disciplinary analysis and opportunities for operations management. **International Journal of Production Research**, v. 59, n. 7, p. 2055–2078, 3 abr. 2021.

JAYASEKERA, R. D. M. D.; XU, X. Assembly validation in virtual reality—a demonstrative case. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 9, p. 3579–3592, 2019.

JIMÉNEZ, M.; PALOMERA, R.; COUVERTIER, I. **Introduction to Embedded Systems**. New York, NY: Springer New York, 2014.

KADIPASAOGLU, S. N. et al. A study on the effect of the extent and location of protective capacity in flow systems. **International Journal of Production Economics**, v. 63, n. 3, p. 217–228, jan. 2000.

KADZIELSKI, M. A. Finally signs of life for healthcare data bank. **Health progress (Saint Louis, Mo.)**, v. 70, n. 2, p. 18, 1989.

KAGERMANN, H. Change Through Digitization—Value Creation in the Age of Industry 4.0. In: **Management of Permanent Change**. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. p. 23–45.

KAHNEMAN, D. **Rápido e devagar: duas formas de pensar**. [s.l.] Objetiva, 2012.

KAIVO-OJA, J. R. L.; LAURAEUS, I. T. The VUCA approach as a solution concept to corporate foresight challenges and global technological disruption. **Foresight**, v. 20, n. 1, p. 27–49, 2018.

KAMBLE, S.; GUNASEKARAN, A.; DHONE, N. C. Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 5, p. 1319–1337, 2020.

KAMBLE, S. S.; GUNASEKARAN, A.; SHARMA, R. Analysis of the driving and dependence power of barriers to adopt industry 4.0 in Indian manufacturing industry. **Computers in Industry**, v. 101, n. May, p. 107–119, 2018.

KAYA, İ. et al. Creating a road map for industry 4.0 by using an integrated fuzzy multicriteria decision-making methodology. **Soft Computing**, v. 0, 2020.

KHAJAVI, S. H.; PARTANEN, J.; HOLMSTRÖM, J. Additive manufacturing in the spare parts supply chain. **Computers in Industry**, v. 65, n. 1, p. 50–63, jan. 2014.

KHAN, M. A.; UDDIN, M. F.; GUPTA, N. **Seven V's of Big Data understanding Big Data to extract value**. Proceedings of the 2014 Zone 1 Conference of the American Society for Engineering Education. **Anais...IEEE**, abr. 2014

KHAN, M.; SILVA, B.; HAN, K. A Web of Things-Based Emerging Sensor Network Architecture for

- Smart Control Systems. **Sensors**, v. 17, n. 2, p. 332, 2017.
- KHEYBARI, S.; KAZEMI, M.; REZAEI, J. Bioethanol facility location selection using best-worst method. **Applied Energy**, v. 242, n. February, p. 612–623, 2019.
- KIM, S.; COX, J. F.; MABIN, V. J. An exploratory study of protective inventory in a re-entrant line with protective capacity. **International Journal of Production Research**, v. 48, n. 14, p. 4153–4178, jul. 2010.
- KIM, S.; MABIN, V. J.; DAVIES, J. The theory of constraints thinking processes: Retrospect and prospect. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 28, n. 2, p. 155–184, 2008.
- KIMBROUGH, C. W. et al. Improved operating room efficiency via constraint management: Experience of a tertiary-care academic medical center. **Journal of the American College of Surgeons**, v. 221, n. 1, p. 154–162, 2015.
- KLOVIENE, L.; UOSYTE, I. Development of performance measurement system in the context of industry 4.0: A case study. **Engineering Economics**, v. 30, n. 4, p. 472–482, 2019.
- KOH, L.; ORZES, G.; JIA, F. The fourth industrial revolution (Industry 4.0): technologies disruption on operations and supply chain management. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 39, n. 6, p. 817–828, 2019.
- KOLBERG, D.; KNOBLOCH, J.; ZÜHLKE, D. Towards a lean automation interface for workstations. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 10, p. 2845–2856, 2017.
- KOLBERG, D.; ZÜHLKE, D. Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies. **IFAC-PapersOnLine**, v. 48, n. 3, p. 1870–1875, 2015.
- KONG, X. T. R. et al. Industrial wearable system: the human-centric empowering technology in Industry 4.0. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 30, n. 8, p. 2853–2869, 2019.
- KOO, P.-H.; BULFIN, R.; KOH, S.-G. Determination of batch size at a bottleneck machine in manufacturing systems. **International Journal of Production Research**, v. 45, n. 5, p. 1215–1231, mar. 2007.
- KOO, P. H.; JANG, J.; SUH, J. Vehicle dispatching for highly loaded semiconductor production considering bottleneck machines first. **International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, v. 17, n. 1, p. 23–38, 2005.
- KORTUEM, G. et al. Smart objects as building blocks for the Internet of things. **IEEE Internet Computing**, v. 14, n. 1, p. 44–51, jan. 2010.
- KOU, G. et al. Evaluation of classification algorithms using MCDM and rank correlation. **International Journal of Information Technology and Decision Making**, v. 11, n. 1, p. 197–225, 2012.
- KOU, G.; PENG, Y.; WANG, G. Evaluation of clustering algorithms for financial risk analysis using MCDM methods. **Information Sciences**, v. 275, p. 1–12, 2014.
- KRAJEWSKI, L. J. et al. Kanban, MRP, and Shaping the Manufacturing Environment. **Management Science**, v. 33, n. 1, p. 39–57, 1987.
- KRISHNAMURTHI, R.; KUMAR, A. Modeling and Simulation for Industry 4.0. In: NAYYAR, A.; KUMAR, A. (Eds.). **A Roadmap to Industry 4.0: Smart Production, Sharp Business and Sustainable Development**. [s.l.: s.n.]. p. 127–141.
- KUMAR, R.; SINGH, S. P.; LAMBA, K. Sustainable robust layout using Big Data approach: A key towards industry 4.0. **Journal of Cleaner Production**, v. 204, p. 643–659, dez. 2018.
- KUNDU, K.; ROSSINI, M.; PORTIOLI-STAUDACHER, A. Analysing the impact of uncertainty reduction on WLC methods in MTO flow shops. **Production & Manufacturing Research**, v. 6, n. 1, p. 328–344, 28 jan. 2018.
- KUSIAK, A. Smart manufacturing. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 1–2, p. 508–517, 17 jan. 2018.
- LADE, P.; GHOSH, R.; SRINIVASAN, S. Manufacturing Analytics and Industrial Internet of Things. **IEEE Intelligent Systems**, v. 32, n. 3, p. 74–79, maio 2017.
- LAGE JUNIOR, M.; GODINHO FILHO, M. Variations of the kanban system: Literature review and classification. **International Journal of Production Economics**, v. 125, n. 1, p. 13–21, 2010.
- LAHRI, V.; SHAW, K.; ISHIZAKA, A. Sustainable supply chain network design problem: Using the integrated BWM, TOPSIS, possibilistic programming, and  $\epsilon$ -constrained methods. **Expert Systems with Applications**, v. 168, n. March 2020, p. 114373, abr. 2021.
- LAI, Y. J.; LIU, T. Y.; HWANG, C. L. TOPSIS for MODM. **European Journal of Operational Research**, v. 76, n. 3, p. 486–500, 1994.
- LAI, Y.; SUN, H.; REN, J. Understanding the determinants of big data analytics (BDA) adoption in logistics and supply chain management. **The International Journal of Logistics Management**, v. 29, n. 2, p. 676–703, 14 maio 2018.
- LAM, K.; ZHAO, X. An application of quality function deployment to improve the quality of teaching.

- International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 15, n. 4, p. 389–413, jun. 1998.
- LAMBA, K.; SINGH, S. P. Big data in operations and supply chain management: current trends and future perspectives. **Production Planning & Control**, v. 28, n. 11–12, p. 877–890, 2017.
- LAND, M. J. et al. Inventory diagnosis for flow improvement—A design science approach. **Journal of Operations Management**, n. December 2020, p. 1–28, 2021.
- LANDER, E.; LIKER, J. K. The Toyota Production System and art: making highly customized and creative products the Toyota way. **International Journal of Production Research**, v. 45, n. 16, p. 3681–3698, 2014.
- LANE, E. F.; VERDINI, W. A. A Consistency Test for AHP Decision Makers. **Decision Sciences**, v. 20, n. 3, p. 575–590, 1989.
- LANG, L. Mafia Offers: dealing with a market constraint. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Eds.). **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010. p. 603–628.
- LASI, H. et al. Industry 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, v. 6, n. 4, p. 239–242, 19 ago. 2014.
- LEA, B. **The impact of management accounting alternatives in different manufacturing environments**. [s.l.] Clemson University, 1998.
- LEA, B. Management accounting in ERP integrated MRP and TOC environments. **Industrial Management & Data Systems**, v. 107, n. 8, p. 1188–1211, 2 out. 2007.
- LEA, B. R.; MIN, H. Selection of management accounting systems in Just-In-Time and Theory of Constraints-based manufacturing. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 13, p. 2879–2910, 2003.
- LEE, C. K. M. et al. Design and application of Internet of things-based warehouse management system for smart logistics. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 8, p. 2753–2768, 18 abr. 2018.
- LEE, E. A.; SESHIA, S. A. **Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach**. 2ª Edição ed. [s.l.] MIT Press, 2017.
- LEE, H.; KIM, C.; PARK, Y. Evaluation and management of new service concepts: An ANP-based portfolio approach. **Computers & Industrial Engineering**, v. 58, n. 4, p. 535–543, 2010.
- LEE, J. H. et al. Research on enhancement of TOC Simplified Drum-Buffer-Rope system using novel generic procedures. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 5, p. 3747–3754, 2010.
- LEE, J.; KAO, H. A.; YANG, S. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. **Procedia CIRP**, v. 16, p. 3–8, 2014.
- LEE, T. R. et al. Using TOC to develop U-tourism and to formulate its marketing strategy. **International Journal of Business Innovation and Research**, v. 14, n. 2, p. 206–238, 2017.
- LESHNO, M.; RONEN, B. The Complete Kit Concept – Implementation in the health care system. **Human Systems Management**, v. 20, n. 4, p. 313–318, 14 out. 2001.
- LI, C.; ZHANG, J.; LUO, Y. Real-time scheduling based on optimized topology and communication traffic in distributed real-time computation platform of storm. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 87, n. October 2016, p. 100–115, jun. 2017.
- LI, Y.; DAI, J.; CUI, L. The impact of digital technologies on economic and environmental performance in the context of industry 4.0: A moderated mediation model. **International Journal of Production Economics**, v. 229, n. May 2019, p. 107777, 2020.
- LIANG, Y. C. et al. Cyber Physical System and Big Data enabled energy efficient machining optimisation. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 46–62, jun. 2018.
- LIAO, Y. et al. The impact of the fourth industrial revolution: a cross-country/region comparison. **Production**, v. 28, n. 0, 2018.
- LIAO, Y.; DE FREITAS ROCHA LOURES, E.; DESCHAMPS, F. Industrial Internet of Things: A Systematic Literature Review and Insights. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 5, n. 6, p. 4515–4525, dez. 2018.
- LIU, L.-L. et al. Integrating theory of constraints and particle swarm optimization in order planning and scheduling for machine tool production. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 57, n. 1–4, p. 285–296, 4 nov. 2011.
- LIU, Y. et al. Cloud manufacturing: key issues and future perspectives. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 32, n. 9, p. 858–874, 2019a.
- LIU, Y. et al. Scheduling in cloud manufacturing: state-of-the-art and research challenges. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 15–16, p. 4854–4879, 29 ago. 2019b.
- LIZARRALDE, A.; APAOLAZA, U.; MEDIÁVILLA, M. A Strategic Approach for Bottleneck Identification in Make-To-Order Environments : A Drum-Buffer-Rope Action Research Based Case Study. **Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 13, n. 1, p. 18–37, 2020.
- LOWALEKAR, H.; BASU, S. Theory of constraints based mafia offer for supply chains of deteriorating

- products. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 14, p. 4421–4449, jul. 2020.
- LOWALEKAR, H.; RAVI, R. R. Revolutionizing blood bank inventory management using the TOC thinking process: An Indian case study. **International Journal of Production Economics**, v. 186, n. April 2016, p. 89–122, abr. 2017.
- LUGERT, A.; BATZ, A.; WINKLER, H. Empirical assessment of the future adequacy of value stream mapping in manufacturing industries. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 29, n. 5, p. 886–906, 13 ago. 2018.
- LUIZ, O. R. et al. Linking the Critical Chain Project Management literature. **International Journal of Managing Projects in Business**, v. 12, n. 2, p. 423–443, jun. 2019.
- MABIN, V. J.; DAVIES, J. Framework for understanding the complementary nature of TOC frames: Insights from the product mix dilemma. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 4, p. 661–680, 14 jan. 2003.
- MABIN, V. J.; GIBSON, J. Synergies from spreadsheet LP used with the theory of constraints—a case study. **Journal of the Operational Research Society**, v. 49, n. 9, p. 918–927, 20 set. 1998.
- MAISANO, D. A. et al. Indoor GPS: system functionality and initial performance evaluation. **International Journal of Manufacturing Research**, v. 3, n. 3, p. 335, 2008.
- MALIK, P. K. et al. Industrial Internet of Things and its Applications in Industry 4.0: State of The Art. **Computer Communications**, v. 166, n. November 2020, p. 125–139, jan. 2021.
- MAPHALE, L.; SMIT, J. L. A Theoretical Proposition for Spatial Data Infrastructure On-Going Improvement. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 10, n. 1, p. 9, 2020.
- MARCONI, M. DE A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.
- MARDANI, A. et al. Multiple criteria decision-making techniques and their applications - A review of the literature from 2000 to 2014. **Economic Research-Ekonomiska Istrazivanja**, v. 28, n. 1, p. 516–571, 2015.
- MARNEWICK, C.; MARNEWICK, A. L. The Demands of Industry 4.0 on Project Teams. **IEEE Transactions on Engineering Management**, p. 1–9, 2019.
- MARQUES, J. A. V. DA C.; CIA, J. N. DE S. Teoria das restrições e contabilidade gerencial: interligando contabilidade a produção. **Revista de Administração de Empresas**, v. 38, n. 3, p. 34–46, set. 1998.
- MATANA, G. et al. Method to assess the adherence of internal logistics equipment to the concept of CPS for industry 4.0. **International Journal of Production Economics**, v. 228, n. December 2019, 2020.
- MATEEN, A.; MORE, D. Applying TOC thinking process tools in managing challenges of supply chain finance: A case study. **International Journal of Services and Operations Management**, v. 15, n. 4, p. 389–410, 2013.
- MCAFEE, A.; BRYNJOLFSSON, E. Big data: The management revolution. **Harvard Business Review**, v. 90, n. 10, p. 4, 2012.
- MCGAUGHEY, R. E.; GUNASEKARAN, A. Enterprise resource Planning (ERP): Past, Present and future. **International Journal of Enterprise Information Systems**, v. 3, n. 3, p. 23–35, 2007.
- MCNEFF, J. G. The global positioning system. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 50, n. 3, p. 645–652, mar. 2002.
- MEUDT, T.; METTERNICH, J.; ABELE, E. Value stream mapping 4.0: Holistic examination of value stream and information logistics in production. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 66, n. 1, p. 413–416, 2017.
- MI, X. et al. The state-of-the-art survey on integrations and applications of the best worst method in decision making: Why, what, what for and what's next? **Omega**, v. 87, p. 205–225, set. 2019.
- MILGRAM, P.; KISHINO, F. A taxonomy of mixed reality visual displays. **IEICE Transactions on Information and Systems**, v. 77, n. 12, p. 1321–1329, 1994.
- MILTENBURG, J. Comparing JIT, MRP and TOC, and embedding TOC into MRP. **International Journal of Production Research**, v. 35, n. 4, p. 1147–1169, 1997.
- MIRZAEI, M. et al. Investigating challenges to SME deployment of operational business intelligence: A case study in the New Zealand retail sector. **UCC 2019 Companion - Proceedings of the 12th IEEE/ACM International Conference on Utility and Cloud Computing**, p. 139–141, 2019.
- MIRZAEI, M.; MABIN, V. J. A review of the scholarly literature on CCPM: a focus on underpinning assumptions. **International Journal of Project Organisation and Management**, v. 10, n. 3, p. 242, 2018.
- MISHRA, J. L. et al. Extending dynamic capabilities towards lean thinking in humanitarian supply chains. **Production Planning & Control**, v. 0, n. 0, p. 1–21, 5 nov. 2020.
- MODI, K.; LOWALEKAR, H.; BHATTA, N. M. K. Revolutionizing supply chain management the theory of constraints way: a case study. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 11, p.

3335–3361, 3 jun. 2019.

MOHAMMADI, M.; REZAEI, J. Bayesian best-worst method: A probabilistic group decision making model. **Omega**, v. 96, p. 102075, out. 2020.

MOHER, D. et al. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. **PLoS Medicine**, v. 6, n. 7, p. e1000097, 21 jul. 2009.

MOKTADIR, M. A. et al. Assessing challenges for implementing Industry 4.0: Implications for process safety and environmental protection. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 117, p. 730–741, 2018.

MOKTADIR, M. A. et al. Barriers to big data analytics in manufacturing supply chains: A case study from Bangladesh. **Computers and Industrial Engineering**, v. 128, n. April 2018, p. 1063–1075, 2019.

MONOSTORI, L. et al. Cyber-physical systems in manufacturing. **CIRP Annals**, v. 65, n. 2, p. 621–641, 2016.

MONOSTORI, L. Cyber-Physical Systems. In: **CIRP Encyclopedia of Production Engineering**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. p. 1–8.

MONSREAL, M. M. et al. Tracking Technologies in Supply Chains. In: **Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

MOTWANI, J.; KLEIN, D.; HAROWITZ, R. The theory of constraints in services: Part 2 - examples from health care. **Managing Service Quality: An International Journal**, v. 6, n. 2, p. 30–34, 1996.

MOURTZIS, D.; VLACHOU, E. A cloud-based cyber-physical system for adaptive shop-floor scheduling and condition-based maintenance. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 47, n. October 2017, p. 179–198, abr. 2018.

MUJBER, T. S.; SZECSI, T.; HASHMI, M. S. J. Virtual reality applications in manufacturing process simulation. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 155–156, p. 1834–1838, nov. 2004.

NANFANG, C.; KAIJUN, L.; TIAN, W. **Rapid response with TOC methodology**. 2008 International Conference on Service Systems and Service Management. **Anais...IEEE**, jun. 2008Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4598561/>>

NAOR, M.; BERNARDES, E. S.; COMAN, A. Theory of constraints: Is it a theory and a good one? **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 2, p. 542–554, 2013.

NAOR, M.; COMAN, A. Offshore responsiveness: theory of Constraints innovates customer services. **Service Industries Journal**, v. 37, n. 3–4, p. 155–166, 2017.

NETLAND, T. H. et al. Teaching Operations Management With Virtual Reality: Bringing the Factory to the Students. **Journal of Management Education**, v. 44, n. 3, p. 313–341, jun. 2020.

NEWBOLD, R. C. Making change stick. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Eds.). **Theory of Constraints Handbook**. Great Barrington: North River Press, 2010. p. 101–121.

NOH, S. M.; KIM, J. H.; JANG, S. Y. A schedule of cleaning processes for a single-armed cluster tool. **International Journal of Industrial Engineering: Theory Applications and Practice**, v. 24, n. 2, p. 232–244, 2017.

OESTERREICH, T. D.; TEUTEBERG, F. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. **Computers in Industry**, v. 83, p. 121–139, dez. 2016.

OLIVEIRA, B. G. et al. Industry 4.0 in systems thinking: From a narrow to a broad spectrum. **Systems Research and Behavioral Science**, v. 37, n. 4, p. 593–606, 2020.

OLSEN, T. L.; TOMLIN, B. Industry 4.0: Opportunities and Challenges for Operations Management. **Manufacturing & Service Operations Management**, v. 22, n. 1, p. 113–122, jan. 2020.

OLUYISOLA, O. E.; SGARBOSSA, F.; STRANDHAGEN, J. O. Smart Production Planning and Control: Concept, Use-Cases and Sustainability Implications. **Sustainability**, v. 12, n. 9, p. 3791, 7 maio 2020.

ONWUBOLU, G. C. Tabu search-based algorithm for the TOC product mix decision. **International Journal of Production Research**, v. 39, n. 10, p. 2065–2076, 2001.

ONWUBOLU, G. C.; MUTINGI, M. A genetic algorithm approach to the theory of constraints product mix problems. **Production Planning and Control**, v. 12, n. 1, p. 21–27, 2001.

OPRESNIK, D.; TAISCH, M. The value of big data in servitization. **International Journal of Production Economics**, v. 165, p. 174–184, 2015.

OSTERRIEDER, P.; BUDDE, L.; FRIEDLI, T. The smart factory as a key construct of industry 4.0: A systematic literature review. **International Journal of Production Economics**, v. 221, n. November 2017, p. 0–1, 2020.

OZTEMEL, E.; GURSEV, S. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 31, n. 1, p. 127–182, 24 jan. 2020.

PAGLIOSA, M.; TORTORELLA, G.; FERREIRA, J. C. E. Industry 4.0 and Lean Manufacturing. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 32, n. 3, p. 543–569, 25 out. 2019.

- PAMUČAR, D. et al. Application of Improved Best Worst Method (BWM) in Real-World Problems. **Mathematics**, v. 8, n. 8, p. 1342, 11 ago. 2020.
- PAN, A. et al. **Exploring the Potential of Using Agent-based Technology in Information Communication in Apparel Supply Chain Management**. 2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics. **Anais...IEEE**, 2006Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4053427/>>
- PAPADOPOULOS, T. et al. Big data and analytics in operations and supply chain management: managerial aspects and practical challenges. **Production Planning & Control**, v. 28, n. 11–12, p. 873–876, 2017.
- PARENTE, M. et al. Production scheduling in the context of Industry 4.0: review and trends. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 17, p. 5401–5431, 2020.
- PARKINSON, B. W.; GILBERT, S. W. NAVSTAR: Global positioning system—Ten years later. **Proceedings of the IEEE**, v. 71, n. 10, p. 1177–1186, 1983.
- PATTI, A. L.; WATSON, K. J. Downtime variability: the impact of duration–frequency on the performance of serial production systems. **International Journal of Production Research**, v. 48, n. 19, p. 5831–5841, 3 out. 2010.
- PERES, R. S. et al. Industrial Artificial Intelligence in Industry 4.0 -Systematic Review, Challenges and Outlook. **IEEE Access**, p. 220121–220139, 2020.
- PONTE, B. et al. Holism versus reductionism in supply chain management: An economic analysis. **Decision Support Systems**, v. 86, p. 83–94, 2016.
- PORTER, K. et al. Manufacturing classifications: Relationships with production control systems. **Integrated Manufacturing Systems**, v. 10, n. 4, p. 189–199, 1999.
- POSCHMANN, H.; BRÜGGEMANN, H.; GOLDMANN, D. Disassembly 4.0: A Review on Using Robotics in Disassembly Tasks as a Way of Automation. **Chemie Ingenieur Technik**, n. 4, p. cite.201900107, 2 mar. 2020.
- POTTER, B. Necessary but not sufficient. **Security & Privacy, IEEE**, v. 8, n. 5, p. 57–58, 2010.
- POURNADER, M. et al. Blockchain applications in supply chains, transport and logistics: a systematic review of the literature. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 7, p. 2063–2081, 2 abr. 2020.
- POWER, Y.; BAHRI, P. A. Integration techniques in intelligent operational management: a review. **Knowledge-Based Systems**, v. 18, p. 89–97, 2005.
- PRETORIUS, P. Necessary but not sufficient - How improved data accuracy and timeliness are not enough for good decision making. **Annual Wonderware User Conference**, v. 8, n. 5, p. 57–58, 2007.
- PUCHE, J. et al. Systemic approach to supply chain management through the viable system model and the theory of constraints. **Production Planning & Control**, v. 27, n. 5, p. 421–430, 2016.
- QUEIROZ, M. M.; FARIAS PEREIRA, S. C. Intention to adopt big data in supply chain management: A Brazilian perspective. **RAE Revista de Administracao de Empresas**, v. 59, n. 6, p. 389–401, 2019.
- QUEIROZ, M. M.; TELLES, R. Big data analytics in supply chain and logistics: an empirical approach. **The International Journal of Logistics Management**, v. 29, n. 2, p. 767–783, 14 maio 2018.
- RADOVILSKY, Z. D. A quantitative approach to estimate the size of the time buffer in the theory of constraints. **International Journal of Production Economics**, v. 55, n. 2, p. 113–119, 1998.
- RAHMAN, S. Theory of constraints. **International Journal of Operations and Project Management**, v. 18, n. 4, p. 336–355, 1998.
- RAMADAN, M. et al. Industry 4.0-Based Real-Time Scheduling and Dispatching in Lean Manufacturing Systems. **Sustainability**, v. 12, n. 6, p. 2272, 14 mar. 2020.
- RATH, D.; SATPATHY, I.; PATNAIK, B. C. M. Augmented reality (Ar) & virtual reality (Vr)-a channel for digital transformation in industrialization fostering innovation & entrepreneurship. **International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering**, v. 8, n. 10, p. 3228–3236, 2019.
- RAUSCHNABEL, P. A.; ROSSMANN, A.; TOM DIECK, M. C. An adoption framework for mobile augmented reality games: The case of Pokémon Go. **Computers in Human Behavior**, v. 76, p. 276–286, nov. 2017.
- REDDY, J.; TELUKDARIE, A. Procedures to accommodate system fluctuations that result in buffer compromised systems governed by the theory of constraints. **IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management**, v. 2017- Decem, p. 539–543, 2018.
- REIS, M. S. A Systematic Framework for Assessing the Quality of Information in Data-Driven Applications for the Industry 4.0. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 18, p. 43–48, 2018.
- REJEB, A. et al. The potentials of augmented reality in supply chain management: a state-of-the-art review. **Management Review Quarterly**, 2020.
- REZAEI, J. Best-worst multi-criteria decision-making method. **Omega**, v. 53, p. 49–57, jun. 2015.
- REZAEI, J. Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model.



- Omega**, v. 64, p. 126–130, out. 2016.
- RIEZEBOS, J.; KORTE, G. J.; LAND, M. J. Improving a practical DBR buffering approach using Workload Control. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 4, p. 699–712, 2003.
- ROBERT, M.; GIULIANI, P.; GURAU, C. Implementing industry 4.0 real-time performance management systems: the case of Schneider Electric. **Production Planning & Control**, v. 0, n. 0, p. 1–17, 27 ago. 2020.
- RODA-SANCHEZ, L. et al. Gesture Control Wearables for Human-Machine Interaction in Industry 4.0. In: **From Bioinspired Systems and Biomedical Applications to Machine Learning**. [s.l.: s.n.]. p. 99–108.
- ROJAS, R. A.; RAUCH, E. From a literature review to a conceptual framework of enablers for smart manufacturing control. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 517–533, 2019.
- ROJKO, A. Industry 4.0 Concept: Background and Overview. **International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)**, v. 11, n. 5, p. 77, 2017.
- ROKOOEI, S. Building Information Modeling in Project Management: Necessities, Challenges and Outcomes. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 210, p. 87–95, 2015.
- ROMERO-SILVA, R.; HERNÁNDEZ-LÓPEZ, G. Shop-floor scheduling as a competitive advantage: A study on the relevance of cyber-physical systems in different manufacturing contexts. **International Journal of Production Economics**, v. 224, n. xxxx, p. 107555, jun. 2020.
- RONEN, B. The complete kit concept. **International Journal of Production Research**, v. 30, n. 10, p. 2457–2466, 16 out. 1992.
- RONEN, B.; STARR, M. K. Synchronized manufacturing as in OPT: from practice to theory. **Computers and Industrial Engineering**, v. 18, n. 4, p. 585–600, 1990.
- ROSIN, F. et al. Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 6, p. 1644–1661, 18 mar. 2020.
- ROSSI, F. et al. Effective integration of Cobots and additive manufacturing for reconfigurable assembly solutions of biomedical products. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, n. 0123456789, 3 ago. 2020.
- ROSSIT, D. A.; TOHMÉ, F.; FRUTOS, M. An Industry 4.0 approach to assembly line resequencing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 9, p. 3619–3630, 2019a.
- ROSSIT, D. A.; TOHMÉ, F.; FRUTOS, M. Production planning and scheduling in Cyber-Physical Production Systems: a review. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 32, n. 4–5, p. 385–395, 4 maio 2019b.
- ROSSMANN, B. et al. The future and social impact of Big Data Analytics in Supply Chain Management: Results from a Delphi study. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 130, n. November 2017, p. 135–149, 2018.
- ROSTAMZADEH, R.; SOFIAN, S. Prioritizing effective 7Ms to improve production systems performance using fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS (case study). **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 5, p. 5166–5177, maio 2011.
- ROTA, I. S.; DE SOUZA, F. B. A proposal for a theory of constraints-based framework in sales and operations planning. **Journal of Applied Research and Technology**, v. 19, n. 2, p. 117–139, 30 abr. 2021.
- RUBEN, R. A.; MAHMOODI, F. Lot splitting in unbalanced production systems. **Decision Sciences**, v. 29, n. 4, p. 921–949, 1998.
- RUSSELL, G. R.; FRY, T. D. Order review/release and lot splitting in drum-buffer-rope. **International Journal of Production Research**, v. 35, n. 3, p. 827–845, 1997.
- RÜTTIMANN, B. G.; STÖCKLI, M. T. From Batch & Queue to Industry 4.0-Type Manufacturing Systems: A Taxonomy of Alternative Production Models. **Journal of Service Science and Management**, v. 13, n. 02, p. 299–316, 2020.
- SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9–26, set. 1990.
- SACKS, R. et al. Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 136, n. 9, p. 968–980, 2010.
- SAENZ DE UGARTE, B.; RTIBA, A.; PELLERIN, R. Manufacturing execution system – a literature review. **Production Planning & Control**, v. 20, n. 6, p. 525–539, 2009.
- SAIF, U. et al. Drum buffer rope-based heuristic for multi-level rolling horizon planning in mixed model production. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 14, p. 1–28, 2019.
- SANDERS, A.; ELANGESWARAN, C.; WULFSBERG, J. Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. **Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 9, n. 3, p. 811–833, 2016.

- SANTOS, C. H. DOS et al. Use of simulation in the industry 4.0 context: Creation of a Digital Twin to optimise decision making on non-automated process. **Journal of Simulation**, v. 00, n. 00, p. 1–14, 2020.
- SARKAR, D.; BALI, R.; SHARMA, T. Machine Learning Basics. In: **Practical Machine Learning with Python**. Berkeley, CA: Apress, 2018. p. 3–65.
- SASSON, A.; JOHNSON, J. C. The 3D printing order: variability, supercenters and supply chain reconfigurations. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 46, n. 1, p. 82–94, 2016.
- SAVAZZI, S.; RAMPA, V.; SPAGNOLINI, U. Wireless Cloud Networks for the Factory of Things: Connectivity Modeling and Layout Design. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 1, n. 2, p. 180–195, 2014.
- SCHEFF, S. W. **Fundamental Statistical Principles for the Neurobiologist**. [s.l.] Elsevier, 2016.
- SCHEINKOPF, L. Thinking Process including S&T trees. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Eds.). **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010. p. 729–786.
- SCHRAGENHEIM, A. Supply Chain Management. In: **Theory of Constraints Handbook**. [s.l.] McGraw-Hill Education, 2010a.
- SCHRAGENHEIM, E. Throughput Economics – Chapter 2: Information equals hard data, intuition and assessment of uncertainty. **Eli Schragenheim**, [s.d.]. Disponível em: <https://elischragenheim.com/throughput-economics-chapter-2-information-equals-hard-data-intuition-and-assessment-of-uncertainty/>. Acesso em: 12 de set. de 2019.
- SCHRAGENHEIM, E. **The TOC Top Management Decision Support - Collaboration between Eli Schragenheim and Vector Consulting Group**, Elyakim Management Systems, 1992.
- SCHRAGENHEIM, E. Product development projects: guidelines for assessing the potential of new products and the planning of various features in a project. In: 目錄. p. 51–70, 1998.
- SCHRAGENHEIM, E. **Improving Some Basic Top Management Decisions**, 2006.
- SCHRAGENHEIM, E. Managing Make-to-Stock and the Concept of Make-to-Availability. In: **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010b. p. 239–264.
- SCHRAGENHEIM, E. What is a Good Plan? The relationships between planning and execution. **Eli Schragenheim**, 2015. Disponível em: <https://elischragenheim.com/2015/11/23/what-is-a-good-plan-the-relationships-between-planning-and-execution/>. Acesso em: 15 de ago. de 2021.
- SCHRAGENHEIM, E. The current TOC achievements in handling uncertainty. **Eli Schragenheim**, 2015. Disponível em: <https://elischragenheim.com/2015/04/15/the-current-toc-achievements-in-handling-uncertainty/>. Acesso em: 15 de ago. de 2021.
- SCHRAGENHEIM, E. TOC and Software – the Search for Value. **Eli Schragenheim**, 2016. Disponível em: <https://elischragenheim.com/2016/04/03/toc-and-software-the-search-for-value/>. Acesso em: 15 de ago. de 2021.
- SCHRAGENHEIM, E. Applying the six questions of technology to digital stores. **Eli Schragenheim**, 2017. Disponível em: <https://elischragenheim.com/2017/04/28/applying-the-six-questions-of-technology-to-digital-stores/>. Acesso em: 15 de ago. de 2021.
- SCHRAGENHEIM, E. The value organizations can get from computerized simulations. **Eli Schragenheim**, 2018a. Disponível em: <https://elischragenheim.com/2018/10/21/the-value-organizations-can-get-from-computerized-simulations/>. Acesso em: 15 de ago. de 2021.
- SCHRAGENHEIM, E. The Role of Intuition in Managing Organizations. **Eli Schragenheim**, 2020a. Disponível em: <https://elischragenheim.com/2020/08/05/the-role-of-intuition-in-managing-organizations/>. Acesso em: 15 de ago. de 2021.
- SCHRAGENHEIM, E. The special role of common and expected uncertainty for management. **Eli Schragenheim**, 2020b. Disponível em: <https://elischragenheim.com/2020/07/01/the-special-role-of-common-and-expected-uncertainty-for-management/>. Acesso em: 15 de ago. de 2021
- SCHRAGENHEIM, E. Forecasts – the Need, the Great Damage, and Using it Right. **Eli Schragenheim**, 2021. Disponível em: <https://elischragenheim.com/2021/04/08/forecasts-the-need-the-great-damage-and-using-it-right/>. Acesso em: 15 de ago. de 2021.
- SCHRAGENHEIM, E.; CAMP, H.; SURACE, R. **Throughput Economics**. New York, NY : Routledge, 2019.: Productivity Press, 2019.
- SCHRAGENHEIM, E.; COX, J.; RONEN, B. Process flow industry—scheduling and control using theory of constraints. **International Journal of Production Research**, v. 32, n. 8, p. 1867–1877, ago. 1994.
- SCHRAGENHEIM, E.; DETTMER, H. W. **Simplified drum-buffer-rope: A whole system approach to high velocity manufacturing**, 2000.
- SCHRAGENHEIM, E.; DETTMER, H. W. **Manufacturing at Warp Speed**. Boca Raton: St. Lucie Press, 2001.
- SCHRAGENHEIM, E.; DETTMER, H. W.; PATTERSON, J. W. **Supply chain management at warp**

- speed: Integrating the system from end to end.** [s.l.] CRC Press, 2009.
- SCHRAGENHEIM, E.; RONEN, B. Drum-buffer-rope shop floor control. **Production and Inventory Management**, v. 31, n. 3, p. 18–22, 1990.
- SCHRAGENHEIM, E.; RONEN, B. Buffer Management - A Diagnostic Tool for Production Control. **Production and Inventory Management Journal**, v. 32, n. 2, p. 74–79, 1991.
- SCHROEDER, A. et al. Capturing the benefits of industry 4.0: a business network perspective. **Production Planning & Control**, v. 30, n. 16, p. 1305–1321, 10 dez. 2019.
- SHI, Z. et al. Smart factory in Industry 4.0. **Systems Research and Behavioral Science**, v. 37, n. 4, p. 607–617, jul. 2020.
- SHIH, H. S.; SHYUR, H. J.; LEE, E. S. An extension of TOPSIS for group decision making. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 45, n. 7–8, p. 801–813, 2007.
- SHIN, D. H.; CHOI, M. J. Ecological views of big data: Perspectives and issues. **Telematics and Informatics**, v. 32, n. 2, p. 311–320, 2015.
- SIHA, S. A classified model for applying the theory of constraints to service organizations. **Managing Service Quality: An International Journal**, v. 9, n. 4, p. 255–264, ago. 1999.
- SILVESTRI, L. et al. Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: A systematic literature review. **Computers in Industry**, v. 123, p. 103335, 2020.
- SIMATUPANG, T. M.; WRIGHT, A. C.; SRIDHARAN, R. Applying the theory of constraints to supply chain collaboration. **Supply Chain Management**, v. 9, n. 1, p. 57–70, 2004.
- SIMON, H. A. Applying Information Technology to Organization Design. **Public Administration Review**, v. 33, n. 3, p. 268, maio 1973.
- SIMS, T.; WAN, H. DA. Constraint identification techniques for lean manufacturing systems. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 43, p. 50–58, 2017.
- SIRIKRAI, V.; YENRADEE, P. Modified drum–buffer–rope scheduling mechanism for a non-identical parallel machine flow shop with processing-time variation. **International Journal of Production Research**, v. 44, n. 17, p. 3509–3531, set. 2006.
- ŚLUSARCZYK, B. INDUSTRY 4.0 – ARE WE READY? **Polish Journal of Management Studies**, v. 17, n. 1, p. 232–248, jun. 2018.
- SMITH, C.; PTAK, C. A. Integrated Supply Chain Beyond MRP—How Actively Synchronized Replenishment (ASR) Will Meet the Current Materials Synchronization Challenge. In: **Theory of Constraints Handbook**. [s.l.] McGraw-Hill Education, 2010. p. 303–371.
- SOARES, N. et al. A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, n. February 2016, p. 845–860, 2017.
- SONY, M. Industry 4.0 and lean management: a proposed integration model and research propositions. **Production & Manufacturing Research**, v. 6, n. 1, p. 416–432, 2018.
- SONY, M.; NAIK, S. Industry 4.0 integration with socio-technical systems theory: A systematic review and proposed theoretical model. **Technology in Society**, v. 61, n. March, p. 101248, maio 2020.
- SORIANO, M.; PONCE, D. A security and usability proposal for mobile electronic commerce. **IEEE Communications Magazine**, v. 40, n. 8, p. 62–67, ago. 2002.
- SOUZA, F. B. DE et al. When less is better: Insights from the product mix dilemma from the Theory of Constraints perspective. **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 19, p. 5839–5852, 2013.
- SOUZA, F. B. DE; BAPTISTA, H. R. Proposta de avanço para o método Tambor-Pulmão-Corda Simplificado aplicado em ambientes de produção sob encomenda. **Gestão & Produção**, v. 17, n. 4, p. 735–746, 2010.
- SOUZA, F. B. DE; PIRES, S. R. I. Produzindo para disponibilidade: Uma aplicação da teoria das restrições em ambientes de produção para estoque. **Gestao e Producao**, v. 21, n. 1, p. 65–76, 2014.
- STEELE, D. C. et al. Comparisons between drum-buffer-rope and material requirements planning: A case study. **International Journal of Production Research**, v. 43, n. 15, p. 3181–3208, 2005.
- STEVENSON, M.; HENDRY, L. C.; KINGSMAN, B. G. A review of production planning and control: the applicability of key concepts to the make-to-order industry. **International Journal of Production Research**, v. 43, n. 5, p. 868–898, 2005.
- STEWART, T. A critical survey on the status of multiple criteria decision making theory and practice. **Omega**, v. 20, n. 5–6, p. 569–586, 1992.
- STHLE, L.; WOLD, S. Analysis of variance (ANOVA). **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 6, n. 4, p. 259–272, nov. 1989.
- STIRLING, A. Analysis, participation and power: justification and closure in participatory multi-criteria analysis. **Land Use Policy**, v. 23, n. 1, p. 95–107, jan. 2006.
- STRANDHAGEN, J. W. et al. The fit of Industry 4.0 applications in manufacturing logistics: a multiple

- case study. **Advances in Manufacturing**, v. 5, n. 4, p. 344–358, 2017.
- STRATTON, R.; KNIGHT, A. Managing patient flow using time buffers. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 21, n. 4, p. 484–498, 2010.
- STUMP, B.; BADURDEEN, F. Integrating lean and other strategies for mass customization manufacturing: a case study. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 23, n. 1, p. 109–124, 17 fev. 2012.
- SVERTOKA, E. et al. Wearables for Industrial Work Safety: A Survey. **Sensors**, v. 21, n. 11, p. 3844, jun. 2021.
- SYBERFELDT, A. et al. **Localizing operators in the smart factory: A review of existing techniques and systems**. 2016 International Symposium on Flexible Automation (ISFA). **Anais...IEEE**, 2016Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7790157/>>
- TAKAMI NARITA, V.; IKEZIRI, L. M.; BERNARDI DE SOUZA, F. Evaluation of dynamic buffer management for adjusting stock level: a simulation-based approach. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 38, n. 6, p. 452–465, 18 ago. 2021.
- TAO, F. et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 94, n. 9–12, p. 3563–3576, 2018.
- TELLES, E. S. et al. Drum-buffer-rope in an engineering-to-order system: An analysis of an aerospace manufacturer using data envelopment analysis (DEA). **International Journal of Production Economics**, v. 222, n. September, p. 107500, abr. 2020.
- THOBEN, K.; WIESNER, S.; WUEST, T. “Industrie 4.0” and Smart Manufacturing – A Review of Research Issues and Application Examples. **International Journal of Automation Technology**, v. 11, n. 1, p. 4–16, 5 jan. 2017.
- THÜRER, M. et al. Drum-buffer-rope and workload control in High-variety flow and job shops with bottlenecks: An assessment by simulation. **International Journal of Production Economics**, v. 188, n. April, p. 116–127, 2017a.
- THÜRER, M. et al. Deconstructing bottleneck shiftiness: the impact of bottleneck position on order release control in pure flow shops. **Production Planning and Control**, v. 28, n. 15, p. 1223–1235, 2017b.
- THÜRER, M. et al. Bottleneck detection in high-variety make-to-Order shops with complex routings: an assessment by simulation. **Production Planning & Control**, p. 1–12, 12 fev. 2021.
- THÜRER, M.; STEVENSON, M. Bottleneck-oriented order release with shifting bottlenecks: An assessment by simulation. **International Journal of Production Economics**, v. 197, n. January, p. 275–282, 2018.
- TJAHJONO, B. et al. What does Industry 4.0 mean to Supply Chain? **Procedia Manufacturing**, v. 13, p. 1175–1182, 2017.
- TKACHENKO, I. et al. Centrality bias measure for high density QR code module recognition. **Signal Processing: Image Communication**, v. 41, p. 46–60, 2016.
- TORBACKI, W. Multi-criteria decision method for choosing ERP cloud systems in Industry 4.0 era. **Multidisciplinary Aspects of Production Engineering**, v. 2, n. 1, p. 435–446, 1 set. 2019.
- TORTORELLA, G. et al. The mediating effect of employees’ involvement on the relationship between Industry 4.0 and operational performance improvement. **Total Quality Management and Business Excellence**, v. 0, n. 0, p. 1–15, 2018.
- TORTORELLA, G. L. et al. Designing lean value streams in the fourth industrial revolution era: proposition of technology-integrated guidelines. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 16, p. 5020–5033, 17 ago. 2020.
- TORTORELLA, G. L. et al. Bundles of Lean Automation practices and principles and their impact on operational performance. **International Journal of Production Economics**, v. 235, n. January, p. 108106, maio 2021.
- TORTORELLA, G. L.; FETTERMANN, D. Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. **International Journal of Production Research**, v. 7543, n. October, p. 1–13, 2017.
- TORTORELLA, G. L.; GIGLIO, R.; VAN DUN, D. H. Industry 4.0 adoption as a moderator of the impact of lean production practices on operational performance improvement. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 39, n. 6/7/8, p. 860–886, 2 dez. 2019.
- TSAI, W.-H. Green Production Planning and Control for the Textile Industry by Using Mathematical Programming and Industry 4.0 Techniques. **Energies**, v. 11, n. 8, p. 2072, 9 ago. 2018.
- TSAI, W.-H.; LAI, S.-Y. Green Production Planning and Control Model with ABC under Industry 4.0 for the Paper Industry. **Sustainability**, v. 10, n. 8, p. 2932, 17 ago. 2018.
- TSAI, W.-H.; LAN, S.-H.; LEE, H.-L. Applying ERP and MES to Implement the IFRS 8 Operating Segments: A Steel Group’s Activity-Based Standard Costing Production Decision Model. **Sustainability**,

- v. 12, n. 10, p. 4303, 25 maio 2020.
- TSAI, W.-H.; LU, Y.-H. A Framework of Production Planning and Control with Carbon Tax under Industry 4.0. **Sustainability**, v. 10, n. 9, p. 3221, 8 set. 2018.
- TSAI, W. H.; JHONG, S. Y. Production decision model with carbon tax for the knitted footwear industry under activity-based costing. **Journal of Cleaner Production**, v. 207, p. 1150–1162, 2019.
- TSOU, C.-M. On the strategy of supply chain collaboration based on dynamic inventory target level management: A theory of constraint perspective. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, n. 7, p. 5204–5214, abr. 2013.
- UMBLE, M.; UMBLE, E.; MURAKAMI, S. Implementing theory of constraints in a traditional Japanese manufacturing environment: The case of Hitachi Tool Engineering. **International Journal of Production Research**, v. 44, n. 10, p. 1863–1880, 2006.
- URBAN, W. TOC implementation in a medium-scale manufacturing system with diverse product routing. **Production and Manufacturing Research**, v. 7, n. 1, p. 178–194, 2019.
- URBAN, W.; ROGOWSKA, P. Methodology for bottleneck identification in a production system when implementing TOC. **Engineering Management in Production and Services**, v. 12, n. 2, p. 74–82, 23 jul. 2020.
- USUGA CADAVID, J. P. et al. Machine learning applied in production planning and control: a state-of-the-art in the era of industry 4.0. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 31, n. 6, p. 1531–1558, 11 ago. 2020.
- VALAMEDE, L. S.; AKKARI, A. C. S. Lean 4.0: A new holistic approach for the integration of lean manufacturing tools and digital technologies. **International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences**, v. 5, n. 5, p. 854–868, 2020.
- VAN RIJMENAM, M. et al. Avoid being the Turkey: How big data analytics changes the game of strategy in times of ambiguity and uncertainty. **Long Range Planning**, v. 52, n. 5, p. 101841, out. 2019.
- VANDAELE, N.; DE BOECK, L. Advanced Resource Planning. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 19, n. 1–2, p. 211–218, fev. 2003.
- VENDRELL-HERRERO, F. et al. Servitization, digitization and supply chain interdependency. **Industrial Marketing Management**, v. 60, p. 69–81, 2017.
- VERDOUW, C. et al. Digital twins in smart farming. **Agricultural Systems**, v. 189, p. 103046, 2021.
- VIDO, M. et al. The impact of the collaborative robot on competitive priorities: case study of an automotive supplier. **Gestão & Produção**, v. 27, n. 4, p. 1–21, 2020.
- VRCHOTA, J. et al. Critical Success Factors of the Project Management in Relation to Industry 4.0 for Sustainability of Projects. **Sustainability**, v. 13, n. 1, p. 281, dez. 2020.
- WAHLERS, J. L.; COX, J. F. Competitive factors and performance measurement: Applying the theory of constraints to meet customer needs. **International Journal of Production Economics**, v. 37, n. 2–3, p. 229–240, 1994.
- WALLENIUS, J. et al. Multiple criteria decision making, multiattribute utility theory: Recent accomplishments and what lies ahead. **Management Science**, v. 54, n. 7, p. 1336–1349, 2008.
- WALSH, D. P. Complex Environments. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Eds.). **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010. p. 1045–65.
- WALT, L. VAN DER. **The application of necessary but not sufficient principles to the implementation of product lifecycle management software**. [s.l.] University of Stellenbosch, 2007.
- WANG, G. et al. Big data analytics in logistics and supply chain management: Certain investigations for research and applications. **International Journal of Production Economics**, v. 176, p. 98–110, jun. 2016a.
- WANG, J. et al. Developing and evaluating a framework of total constraint management for improving workflow in liquefied natural gas construction. **Construction Management and Economics**, v. 34, n. 12, p. 859–874, 12 dez. 2016b.
- WANG, J. Q. et al. Theory of constraints product mix optimisation based on immune algorithm. **International Journal of Production Research**, v. 47, n. 16, p. 4521–4543, 2009.
- WANG, K.-C. et al. Applying building information modeling to integrate schedule and cost for establishing construction progress curves. **Automation in Construction**, v. 72, p. 397–410, dez. 2016c.
- WANG, L. et al. Demand-pull replenishment model for hospital inventory management: a dynamic buffer-adjustment approach. **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 24, p. 7533–7546, 17 dez. 2015.
- WANG, S. et al. Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 12, n. 1, p. 3159805, 18 jan. 2016d.
- WANG, Y. et al. Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production. **Advances in Manufacturing**, v. 5, n. 4, p. 311–320, 2017.
- WATSON, K. J.; BLACKSTONE, J. H.; GARDINER, S. C. The evolution of a management philosophy:

- The theory of constraints. **Journal of Operations Management**, v. 25, p. 387–402, 2007.
- WATSON, K. J.; PATTI, A. A comparison of JIT and TOC buffering philosophies on system performance with unplanned machine downtime. **International Journal of Production Research**, v. 46, n. 7, p. 1869–1885, 2008.
- WATSON, K.; POLITO, T. Comparison of DRP and TOC financial performance within a multi-product, multi-echelon physical distribution environment. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 4, p. 741–765, 2003.
- WHYTE, J. How Digital Information Transforms Project Delivery Models. **Project Management Journal**, v. 50, n. 2, p. 177–194, 5 abr. 2019.
- WIECH, M. et al. Implementation of big data analytics and Manufacturing Execution Systems: an empirical analysis in German-speaking countries. **Production Planning and Control**, v. 0, n. 0, p. 1–16, 2020.
- WOO, K.; PARK, S.; FUJIMURA, S. Real-time buffer management method for DBR scheduling. **International Journal of Manufacturing Technology and Management**, v. 16, n. 1/2, p. 42, 2009.
- WORTMANN, F.; FLÜCHTER, K. Internet of Things. **Business & Information Systems Engineering**, v. 57, n. 3, p. 221–224, 27 jun. 2015.
- WU, H. H. et al. Simulation and scheduling implementation study of TFT-LCD Cell plants using Drum-Buffer-Rope system. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 12, p. 8127–8133, 2010.
- WU, H. Y. et al. Exploring the critical influential factors of creativity for college students: A multiple criteria decision-making approach. **Thinking Skills and Creativity**, v. 11, p. 1–21, 2014.
- WU, J.; ZHANG, J. New Automated BIM Object Classification Method to Support BIM Interoperability. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 33, n. 5, p. 4019033, 2019.
- WU, K.; ZHENG, M.; SHEN, Y. A generalization of the Theory of Constraints: Choosing the optimal improvement option with consideration of variability and costs. **IIE Transactions**, v. 52, n. 3, p. 276–287, mar. 2020.
- WU, S. Y.; MORRIS, J. S.; GORDON, T. M. A simulation analysis of the effectiveness of drum-buffer-rope scheduling in furniture manufacturing. **Computers and Industrial Engineering**, v. 26, n. 4, p. 757–764, 1994.
- XU, L. DA; XU, E. L.; LI, L. Industry 4.0: state of the art and future trends. **International Journal of Production Research**, v. 7543, p. 1–22, 2018.
- XU, X. From cloud computing to cloud manufacturing. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 28, n. 1, p. 75–86, 2012.
- YANG, S. et al. Opportunities for industry 4.0 to support remanufacturing. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 8, n. 7, 2018a.
- YANG, S. et al. Opportunities for Industry 4.0 to Support Remanufacturing. **Applied Sciences**, v. 8, n. 7, p. 1177, 19 jul. 2018b.
- YE, T. Queueing network analysis on dynamic lot streaming. **Computers & Operations Research**, v. 36, n. 2, p. 415–424, 2009.
- YE, T.; HAN, W. Determination of buffer sizes for drum–buffer–rope (DBR)-controlled production systems. **International Journal of Production Research**, v. 46, n. 10, p. 2827–2844, 2008.
- YILDIZBAŞI, A.; ÜNLÜ, V. Performance evaluation of SMEs towards Industry 4.0 using fuzzy group decision making methods. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 3, 2020.
- YIN, Y.; STECKE, K. E.; LI, D. The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 1–2, p. 848–861, 17 jan. 2018.
- YOON, K.; HWANG, C.-L. **Multiple Attribute Decision Making**. 2455 Teller Road, Thousand Oaks California 91320 United States of America: SAGE Publications, Inc., 1995.
- YOU, P. et al. Operation Performance Evaluation of Power Grid Enterprise Using a Hybrid BWM-TOPSIS Method. **Sustainability**, v. 9, n. 12, p. 2329, 15 dez. 2017.
- ZAFARZADEH, M.; WIKTORSSON, M.; BAALSRUD HAUGE, J. A Systematic Review on Technologies for Data-Driven Production Logistics: Their Role from a Holistic and Value Creation Perspective. **Logistics**, v. 5, n. 2, p. 24, 2021.
- ZANGIACOMI, A. et al. Moving towards digitalization: a multiple case study in manufacturing. **Production Planning and Control**, v. 31, n. 2–3, p. 143–157, 2020.
- ZAVADSKAS, E. K.; TURSKIS, Z. Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: An overview. **Technological and Economic Development of Economy**, v. 17, n. 2, p. 397–427, 2011.
- ZHANG, L. et al. Cloud manufacturing: a new manufacturing paradigm. **Enterprise Information Systems**, v. 8, n. 2, p. 167–187, mar. 2014.
- ZHANG, L. et al. Digital Twins for Additive Manufacturing: A State-of-the-Art Review. **Applied Sciences**, v. 10, n. 23, p. 8350, 24 nov. 2020.
- ZHANG, Y. et al. The ‘Internet of Things’ enabled real-time scheduling for remanufacturing of

- automobile engines. **Journal of Cleaner Production**, v. 185, p. 562–575, jun. 2018.
- ZHAO, X.; HOU, J. Analyzing the time buffer in the Theory of Constraints based lean operations. **Journal of Management Analytics**, v. 1, n. 3, p. 185–199, 2014.
- ZHENG, P. et al. Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. **Frontiers of Mechanical Engineering**, v. 13, n. 2, p. 137–150, 23 jun. 2018.
- ZHONG, R. Y. et al. A big data approach for logistics trajectory discovery from RFID-enabled production data. **International Journal of Production Economics**, v. 165, p. 260–272, jul. 2015.
- ZHONG, R. Y. et al. Big Data Analytics for Physical Internet-based intelligent manufacturing shop floors. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 9, p. 2610–2621, 3 maio 2017.
- ZHOU, K.; LIU, T.; LIANG, L. From cyber-physical systems to Industry 4.0: Make future manufacturing become possible. **International Journal of Manufacturing Research**, v. 11, n. 2, p. 167–188, 2016.
- ZÖLLER, S. et al. Integrating Smart Objects as Data Basis in Virtual Enterprise Collaborations. In: **Enterprise Interoperability VI**. Cham: Springer International Publishing, 2014. p. 297–305.
- ZUNINO, C. et al. Factory Communications at the Dawn of the Fourth Industrial Revolution. **Computer Standards and Interfaces**, v. 71, n. March, p. 103433, 2020.

## APÊNDICE A – QUADRO DE ANÁLISE DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE INDÚSTRIA 4.0 E TOC

Este apêndice reúne seis quadros, que foram elaborados para analisar o conteúdo da amostra de artigos da revisão sistemática de Indústria 4.0 e TOC. Os Quadros A1, A2 e A3 sistematizam os principais temas tratados nos artigos da amostra, classificando nos eixos tecnológicos da Indústria 4.0. Para a análise, foram utilizados o *framework* de tecnologias e conceitos chave da Indústria 4.0, proposto por Oesterreich e Teuteberg (2016) (Quadro A1a), os componentes do modelo de pesquisa em *smart factory*, desenvolvido por Osterrieder et al. (2020) (Quadro A2a) e os fatores e elementos da Indústria 4.0, indicados no artigo de Horváth e Szabó (2019) (Quadro A3a). Para a sistematização dentro das áreas da TOC, foi adotada a abordagem de Blackstone (2001), ampliada por Ikeziri et al. (2019). Esta síntese específica nas áreas da TOC é mostrada nos Quadros A1b, A2b e A3b.

Quadro A1a - Conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 segundo Oesterreich e Teuteberg em trabalhos sobre TOC (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016)

Cluster	Tecnologias e conceitos chave
Smart Factory (C1)	Cyber-Physical systems/Embedded systems/Rfid : Combinação entre Rfid, simulação, métodos de identificação de gargalos e TOC, para atingir agilidade em ambientes de alta incerteza (CHOU; WANG; SHEU, 2016).
	<i>Internet of Things/Internet of Services</i> : Redução de custos de aplicação de IoT para monitoramento dos gargalos identificados e gerenciados pelos princípios da TOC (BALAJI et al., 2018).
	DBR based algorithms suportam a implantação de IoT, por facilitar a disponibilidade do <i>status</i> dos recursos em tempo real (SAIF et al., 2019).
	Automation: (sem menção na amostra).
	Modularisation/Prefabrication: Integração TOC e <i>Lean</i> para a customização em massa de baixo nível, com restrição fixa, claramente



	<p>identificável (montagem e uso) (STUMP; BADURDEEN, 2012).</p> <p>Análise da contribuição da modularização para elevar a performance por meio das TP tools (EIDELWEIN et al., 2018).</p> <p>Additive <i>Manufacturing</i>: (sem menção na amostra).</p> <p>Product-Lifecycle-Management (PLM): (sem menção na amostra).</p> <p>Robotics: Programação de robô usando algoritmo baseado nos 5 Focusing Steps (NOH; KIM; JANG, 2017).</p> <p>Human-Computer Interaction (HCI): (sem menção na amostra).</p>
Simulation and modelling (C2)	<p>Simulation tools/Simulation models: (sem menção na amostra).</p> <p>Building Information Modelling: (sem menção na amostra).</p> <p>Augmented Reality (AR)/Virtual Reality (VR)/Mixed Reality (MR): (sem menção na amostra).</p>
Digitisation and virtualisation (C3)	<p><i>Cloud Computing</i>: Demand-pull e <i>Buffer Management</i> aplicados ao armazenamento em nuvem (CHANG; CHANG; CHANG, 2017).</p> <p><i>Big data</i> : Técnicas de time-series data mining para determinar tamanho de pulmão/inventory target level (TSOU, 2013).</p> <p>Algoritmos baseados na TOC para otimização de tecnologias de processamento de <i>big data</i> em tempo real (LI; ZHANG; LUO, 2017).</p> <p>Informações precisas e oportunas sobre o custo de produção por tecnologias da Indústria 4.0 podem identificar e romper as restrições (TSAI; LAI, 2018).</p> <p>Uso de <i>big data</i> para monitoramento da utilização de capacidade pode auxiliar a aplicação da TOC (TSAI; LU, 2018).</p> <p><i>Mobile Computing</i>: Identificação de restrição de sistemas de comércio eletrônico móvel por <i>internet</i> sem fio (SORIANO; PONCE, 2002).</p> <p>Estudo sobre o impacto de tecnologias mobile nas restrições e <i>throughput</i> em operações de healthcare (GROOP; REIJONSAARI; LILLRANK, 2010).</p>

	Social Media: (sem menção na amostra).
	Digitisation: Modelos de otimização aplicando custeio ABC e TOC combinado com sistemas MES avançados, com controle de WIP e monitoramento de <i>status</i> da fábrica (TSAI, 2018; TSAI; LU, 2018).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro A1b - Tecnologias e conceitos da Indústria 4.0 analisados por área de aplicação da TOC

Áreas de aplicação da TOC	Clusters conceituais e tecnológicos da Indústria 4.0		
	<i>Smart Factory</i> (C1)	Simulation and modelling (C2)	Digitisation and virtualisation (C3)
Operations	<p>Customização em massa (STUMP; BADURDEEN, 2012)</p> <p>Combinação entre RFID, simulação, métodos de identificação de gargalos e TOC, para atingir agilidade em ambientes de alta incerteza (CHOU; WANG; SHEU, 2016)</p> <p>DBR based algorithms suportam a implantação de IoT, por facilitar a disponibilidade do <i>status</i> dos recursos em tempo real (SAIF et al., 2019)</p>	<p>Aplica simulação para avaliação da implementação de TOC (STUMP; BADURDEEN, 2012)</p>	<p>Estudo sobre o impacto de tecnologias mobile nas restrições e <i>throughput</i> em operações de healthcare (GROOP; REIJONSAARI; LILLRANK, 2010)</p> <p>Modelos de otimização aplicando custeio ABC e TOC combinado com sistemas MES avançados, com controle de WIP e monitoramento de <i>status</i> da fábrica (TSAI, 2018; TSAI; LU, 2018)</p> <p>Demand-pull e <i>Buffer</i> Management aplicados ao armazenamento em nuvem (CHANG; CHANG; CHANG, 2017)</p> <p>Uso de <i>big data</i> para monitoramento da utilização de capacidade pode auxiliar a aplicação da TOC (TSAI; LU, 2018)</p>
Finance and Measurement, <i>Throughput</i>			

<i>accounting/economics</i>			
Projects			
Distribution and <i>Supply chains</i>			Técnicas de time-series data mining para determinar tamanho de pulmão/inventory target level (TSOU, 2013)
<i>Marketing</i>			
Sales			
Managing People			
<i>Thinking processes and S&amp;T</i>	Análise da contribuição da modularização para elevar a performance em manufatura por meio das TP tools (EIDELWEIN et al., 2018)		
Process of On-Going Improvement	<p>Programação de robô usando algoritmo baseado nos 5 Focusing Steps (NOH; KIM; JANG, 2017)</p> <p>Redução de custos de aplicação de IoT para monitoramento dos gargalos identificados e gerenciados pelos princípios da TOC (BALAJI et al., 2018)</p>		<p>Algoritmos baseados na TOC para otimização de tecnologias de processamento de <i>big data</i> em tempo real (LI; ZHANG; LUO, 2017)</p> <p>Informações precisas e oportunas sobre o custo de produção por tecnologias da Indústria 4.0 podem identificar e romper as restrições (TSAI; LAI, 2018)</p>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro A2a – Componentes do modelo de pesquisa em *Smart Factory* (OSTERRIEDER; BUDDE; FRIEDLI, 2020)

Grupos	Características	Resultados da amostra
--------	-----------------	-----------------------

Decision making	Data-based decision making situations	Informações precisas e oportunas sobre o custo de produção por tecnologias da Indústria 4.0 podem identificar e romper as restrições (TSAI; LAI, 2018).
	Tecnologies used: artificial intelligence, <i>machine learning</i> , predictive analytics	Modelos de inteligência artificial competem com os modelos heurísticos da TOC (HILMOLA; GUPTA, 2015).
	Intelligent data-based decision models and algorithms	Modelos de otimização aplicando custeio ABC e TOC combinado com sistemas MES avançados, com controle de WIP e monitoramento de <i>status</i> da fábrica (TSAI, 2018; TSAI; LU, 2018).
Cyber-physical systems	Assistant systems for operators	(sem menção na amostra).
	Self-steering <i>manufacturing</i> systems	(sem menção na amostra).
	Autonomous running <i>factory</i>	(sem menção na amostra).
	Dynamic routing and self-organization	(sem menção na amostra).
Data-handling	Exploitation of data potential	(sem menção na amostra).
	Data generation, acquisition, mining, and analysis	(sem menção na amostra).
	Digitalization of information (digital twin)	(sem menção na amostra).
	Data mining processes	Técnicas de time-series data mining para determinar tamanho de pulmão/inventory target level (TSOU, 2013).
	Usage of real-time data	DBR based algorithms facilitam a disponibilidade do <i>status</i> dos recursos em tempo real (SAIF et al., 2019).
	<i>Big data</i> extraction, handling, and analytics	Algoritmos baseados na TOC para otimização de tecnologias de processamento de <i>big data</i> em tempo real (LI; ZHANG; LUO, 2017).  Uso de <i>big data</i> para monitoramento da utilização de capacidade pode auxiliar a aplicação da

		TOC (TSAI; LU, 2018).
	Autonomous data exchange	(sem menção na amostra).
	Single source of truth	(sem menção na amostra).
IT infrastructure	<i>Hardware and software</i> necessities	Redes de <i>internet</i> sem fio para comunicação móvel (SORIANO; PONCE, 2002)
	Connected (end-to-end) system	(sem menção na amostra).
	Horizontal and vertical integration	(sem menção na amostra).
	High speed network	(sem menção na amostra).
	Deep convergence	(sem menção na amostra).
Digital Transformation	Intelligent and connected production systems	Estudo sobre o impacto de tecnologias mobile nas restrições e <i>throughput</i> em operações de healthcare (GROOP; REIJONSAARI; LILLRANK, 2010).
	Visions, barriers, and success factors	(sem menção na amostra).
	Change management	(sem menção na amostra).
	Organization of <i>smart</i> factories	(sem menção na amostra).
Human-machine interaction	Digital and physical assistant systems	(sem menção na amostra).
	Human role in a connected <i>factory</i>	(sem menção na amostra).
	Collaboration and human role in autonomous factories	(sem menção na amostra).
<i>Internet of Things</i> (IoT)	Connectivity of elements in production systems and <i>supply chains</i>	Conectividade efetivamente aplicada apenas nas restrições (BALAJI et al., 2018).

	Sensor technologies	Detecção de gargalos por meio de sistemas de sensores e IoT (TSAI; LU, 2018).
	Traceability of information about process and product	Combinação entre RFID, simulação, métodos de identificação de gargalos e TOC, para atingir agilidade em ambientes de alta incerteza (CHOU; WANG; SHEU, 2016).  Redução de custos de aplicação de IoT para monitoramento dos gargalos identificados e gerenciados pelos princípios da TOC (BALAJI et al., 2018; SAIF et al., 2019).
<i>Cloud manufacturing</i> and services	Digitalization of knowledge	(sem menção na amostra).
	Explorations of new services and business models	(sem menção na amostra).
	On demand and <i>cloud manufacturing</i>	Demand-pull e <i>Buffer</i> Management aplicados ao armazenamento em nuvem (CHANG; CHANG; CHANG, 2017).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro A2b – Componentes da *smart factory* analisados por área de aplicação da TOC

Áreas de aplicação da TOC	Clusters conceituais e tecnológicos da Indústria 4.0						
	Decision making	CPS	Data handling	IT infrastructure	Digital transformation	HMI	IOT
Operations	Modelos de otimização aplicando custeio ABC e TOC combinado com sistemas MES avançados, com controle de WIP e monitoramento de <i>status</i> da fábrica (TSAI, 2018; TSAI; LU, 2018)		DBR based algorithms facilitam a disponibilidade do <i>status</i> dos recursos em tempo real (SAIF et al., 2019)  Uso de <i>big data</i> para monitoramento da utilização de		Estudo sobre o impacto de tecnologias mobile nas restrições e <i>throughput</i> em operações de healthcare (GROOP; REIJONSAARI; LILLRANK, 2010)		Detecção de gargalos por meio de sistemas de sensores e IoT (TSAI; LU, 2018)  Combinação entre RFID, simulação, métodos de identificação de gargalos e TOC, para atingir agilidade em ambientes de alta incerteza (CHOU; WANG; SHEU, 2016)

	Modelos de inteligência artificial competem com os modelos heurísticos da TOC (HILMOLA; GUPTA, 2015)		capacidade pode auxiliar a aplicação da TOC (TSAI; LU, 2018)				
Finance and Measurement, <i>Throughput accounting/economics</i>							
Projects							
Distribution and <i>Supply chains</i>			Técnicas de time-series data mining para determinar tamanho de pulmão/inventory target level (TSOU, 2013)				
<i>Marketing</i>							
Sales							
Managing People							
<i>Thinking processes and S&amp;T</i>							
Process of On-Going Improvement	Informações precisas e oportunas sobre o custo de produção por		Algoritmos baseados na TOC para otimização de	Identificação de restrições em sistemas de			Redução de custos de aplicação de IoT para monitoramento dos gargalos identificados e gerenciados pelos

	tecnologias da Indústria 4.0 podem identificar e romper as restrições (TSAI; LAI, 2018)		tecnologias de processamento de <i>big data</i> em tempo real (LI; ZHANG; LUO, 2017)	comunicação móvel (SORIANO; PONCE, 2002)		princípios da TOC (BALAJI et al., 2018; SAIF et al., 2019)  Conectividade efetivamente aplicada apenas nas restrições (BALAJI et al., 2018)
--	---	--	--	--	--	---

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro A3a - Principais fatores e elementos da Indústria 4.0 (HORVÁTH; SZABÓ, 2019)

Fatores	Elementos
Coleta e processamento de dados	Coleta de dados: Uso de meios digitais e móveis para coleta de dados em operações (GROOP; REIJONSAARI; LILLRANK, 2010). Produção puxada pela demanda e Gerenciamento de Pulmão aplicados ao armazenamento em nuvem (CHANG; CHANG; CHANG, 2017).
	<i>Big data</i> : Algoritmos baseados na TOC para otimização de tecnologias de processamento de <i>big data</i> em tempo real (LI; ZHANG; LUO, 2017). Uso de <i>big data</i> para monitoramento da utilização de capacidade pode auxiliar a aplicação da TOC (TSAI; LU, 2018).
	Processamento de dados: (sem menção na amostra).
	Análise de dados: Técnicas de time-series data mining para determinar tamanho de pulmão/inventory target level (TSOU, 2013). Informações precisas e oportunas sobre o custo de produção por tecnologias da Indústria 4.0 podem identificar e romper as restrições (TSAI; LAI, 2018).
Otimização do processo de produção	Otimização, usando dados de produção: Modelos de otimização aplicando custeio ABC e TOC combinado com sistemas MES avançados (TSAI, 2018; TSAI; LU, 2018).
	Redução da proporção de sucata por processamento digital de dados (HILMOLA; GUPTA, 2015).
	Aplicação de sistemas de controle da produção: Custeio ABC e TOC, com controle de WIP e monitoramento de <i>status</i> da fábrica



	<p>(TSAI, 2018; TSAI; LU, 2018).</p> <p>Redução de custos de aplicação de IoT para monitoramento dos gargalos identificados e gerenciados pelos princípios da TOC (BALAJI et al., 2018).</p> <p>TPC como mecanismo de controle da produção no contexto da Indústria 4.0 (COSTA et al., 2019).</p>
	<p>Elevando as capacidades de desenvolvimento de produtos: Análise da contribuição da modularização para elevar a performance em manufatura por meio das ferramentas dos TP (EIDELWEIN et al., 2018).</p>
Comunicação Máquina-a-Máquina	<p>Integração de sistemas: (sem menção na amostra).</p> <p>Sensores inteligentes e de vibração: Detecção de gargalos por meio de sistemas de sensores e IoT (TSAI; LU, 2018).</p> <p>IO-Link: (sem menção na amostra).</p> <p>Aplicação de câmeras: (sem menção na amostra).</p> <p>Tecnologias sem fio: Elevação de restrições em sistemas mobile para <i>e-commerce</i> (SORIANO; PONCE, 2002). Estudo sobre o impacto de tecnologias móveis nas restrições e ganho em operações de saúde (GROOP; REIJONSAARI; LILLRANK, 2010).</p>
Rastreabilidade da produção	<p>Rastreamento preciso do processo de produção: Combinação entre RFID, simulação, métodos de identificação de gargalos e TOC, para atingir agilidade em ambientes de alta incerteza (CHOU; WANG; SHEU, 2016).</p> <p>Algoritmos baseados em TPC suportam a implantação de IoT, por facilitar a disponibilidade do <i>status</i> dos recursos em tempo real (SAIF et al., 2019).</p> <p>Identificação única de produtos e componentes: (sem menção na amostra).</p>
Trabalho sem intervenção humana	<p>Trabalho com robôs: Programação de robô usando algoritmo baseado nos 5FS (NOH; KIM; JANG, 2017).</p> <p>Aplicação de robôs colaborativos (<i>cobots</i>) a tarefas de P&amp;D: (sem menção na amostra).</p> <p>Substituição dos sentidos humanos: (sem menção na amostra).</p> <p>Sistemas de auto-aprendizado e auto-regulação: Modelos de inteligência artificial competem com os modelos heurísticos da TOC (HILMOLA; GUPTA, 2015).</p> <p>Movimento automático de produtos e transportadores sem intervenção humana: (sem menção na amostra).</p>
Manutenção preventiva	<p>Monitoramento das condições do Sistema: Sem menção na amostra.</p>

	Meios de evitar parada de produção: Sem menção na amostra.
	Sistemas automonitorados: Monitoramento de estado e manutenção preditiva MES em conjunto com modelos de otimização baseados em TOC (TSAI, 2018).
Visualization	Disposição visual de informação: (sem menção na amostra).
	Sistemas <i>pick-to-light</i> : (sem menção na amostra).
	Intelligent industrial lighting systems: (sem menção na amostra).
Augmented reality	Linking virtual reality and reality: (sem menção na amostra).
	Supporting step-by-step processes: (sem menção na amostra).
	Maintenance including performance measurement: (sem menção na amostra).
	Quality control: (sem menção na amostra).
	Training solutions: (sem menção na amostra).
Intelligent warehousing and logistics	Intelligent warehouse systems: (sem menção na amostra).
	Radio frequency identification (RFID): Combinação entre RFID, simulação, métodos de identificação de gargalos e TOC, para atingir agilidade em ambientes de alta incerteza (CHOU; WANG; SHEU, 2016).
	Intelligent logistics: (sem menção na amostra).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro A3b – Fatores da Indústria 4.0 analisados por área de aplicação da TOC

	Fatores								
Áreas de aplicação da TOC	Data collection and processing	Optimization of the production process	Machine-to-machine communication	Traceability of production	Work without human intervention	Preventive maintenance	Visualization	Augmented reality	Intelligent warehousing and logistics
Operations	Uso de meios digitais e móveis			Técnicas de time-series data mining					Algoritmos baseados na

	para coleta de dados em operações (GROOP; REIJONSAARI; LILLRANK, 2010)			para determinar tamanho de pulmão/inventory target level (TSOU, 2013)					TOC para otimização de tecnologias de processamento de <i>big data</i> em tempo real (LI; ZHANG; LUO, 2017)
Finance and Measurement, <i>Throughput accounting/economics</i>	Demand-pull e <i>Buffer Management</i> aplicados ao armazenamento em nuvem (CHANG; CHANG; CHANG, 2017)								Informações precisas e oportunas sobre o custo de produção por tecnologias da Indústria 4.0 podem identificar e romper as restrições (TSAI; LAI, 2018)
Projects	Uso de <i>big data</i> para monitoramento da utilização de capacidade pode auxiliar a aplicação da TOC (TSAI; LU,								

	2018)								
Distribution and <i>Supply chains</i>	Custeio ABC e TOC, com controle de WIP e monitoramento de <i>status</i> da fábrica (TSAI, 2018) DBR como mecanismo de controle da produção no contexto da Indústria 4.0 (COSTA et al., 2019)							Análise da contribuição da modularização para elevar a performance em manufatura por meio das TP tools (EIDELWEIN et al., 2018)	Redução de custos de aplicação de IoT para monitoramento dos gargalos identificados e gerenciados pelos princípios da TOC (BALAJI et al., 2018)
<i>Marketing</i>	Estudo sobre o impacto de tecnologias mobile nas restrições e <i>throughput</i> em operações de healthcare (GROOP; REIJONSAARI; LILLRANK, 2010)								Elevação de restrições em sistemas mobile para e-commerce (SORIANO; PONCE, 2002)
Managing People	Deteção de gargalos por meio de sistemas de sensores e IoT (TSAI; LU, 2018)								
Sales	Combinação entre								

	RFID, simulação, métodos de identificação de gargalos e TOC, para atingir agilidade em ambientes de alta incerteza (CHOU; WANG; SHEU, 2016)								
<i>Thinking processes and S&amp;T</i>	DBR based algorithms suportam a implantação de IoT, por facilitar a disponibilidade do <i>status</i> dos recursos em tempo real (SAIF et al., 2019)								
Process of On-Going Improvement	Modelos de inteligência artificial competem com os modelos heurísticos da TOC (HILMOLA; GUPTA, 2015)								Programação de robô usando algoritmo baseado nos 5 Focusing Steps (NOH; KIM; JANG, 2017)

Fonte: Elaborado pelo autor.

## APÊNDICE B - *SCRIPT* PARA ANÁLISE DE VARIÂNCIA E TESTES DE HIPÓTESES PARA RESULTADOS DO ESTÁGIO BWM

```

# Instalando pacotes necessários
install.packages("gplots")
install.packages("writexl")
install.packages("PMCMRplus")
install.packages("onewaytests")

# Lendo .csv com Pesos (linhas são critérios, colunas são respondentes)
setwd("C:/Users/João Victor/ Resultados")
dados <- read.csv("Pesos.csv", sep = ";", header = TRUE, fileEncoding="UTF-
8-BOM")

dados
attach(dados)

# Transformando variável de grupo em fator
dados[,2] <- as.factor(dados[,2])

# Conferindo se o data frame está ok
str(dados)

# Fazendo boxplots e meanplots dos dados
boxplot(Pesos ~ Atividade, data = dados,
        xlab = "Atividades de TPC/GP", ylab = "Peso",
        frame = FALSE)
# Mean plots
library("gplots")
plotmeans(Pesos ~ Atividade, data = dados, frame = FALSE,
          xlab = "Atividades de TPC/GP", ylab = "Peso", n.lab = FALSE,
          main="Mean plot com 95% de nível de confiança")

# Checando a homogeneidade da variância com um gráfico "resíduo x média".

```

```

plot(res.aov, 1)

# Testando a homocedasticidade pelo Teste de Levene (p-valor deve ser maior
do que 0,05 para ser homocedástico)
library(car)
leveneTest(Pesos ~ Atividade, data = dados)

# Checando a normalidade dos resíduos, fazendo o Q-Q Plot
plot(res.aov, 2)
# Extraindo os resíduos do modelo ANOVA
aov_residuals <- residuals(object = res.aov )
# Rodando o teste de Shapiro-Wilk
shapiro.test(x = aov_residuals )
## Se o p-valor for < 0.05, os dados não apresentam normalidade.

# Se algum pressuposto do ANOVA não for cumprido, é preferível realizar teste
não paramétrico em vez de ANOVA
# Teste de Friedman (multiple joint sample)
## Ex.: Mesmos pacientes são tem urina medida após vários tipos de diurético
y<-read.csv("Pesos-Matriz.csv", sep = ";", header = FALSE,
fileEncoding="UTF-8-BOM")
y<-as.matrix(y)
friedman.test(y)
## Se o p-valor for menor do que 0,05, existe diferença significativa entre pelo
menos duas alternativas
pairwise<-posthoc.friedman.conover.test(y=y, p.adjust="fdr")
pairwise
pairwisefdf <- as.data.frame(pairwise9$p.value)
write_xlsx(pairwisefdf, 'Pairwise - Pesos - Friedman pos Conover.xlsx')

```

## APÊNDICE C - *SCRIPT* EM R PARA ESTÁGIO TOPSIS DO MÉTODO DE PESQUISA

```

## Script para rodar TOPSIS usando o pacote 'topsis' do R
# Instalar o pacote e colocá-lo em funcionamento
install.packages("topsis")
library(topsis)
# Indicar pasta com os arquivos
setwd("C:/Users/Documents")
# Ler arquivo .csv com matriz de respostas do TOPSIS para um autor
#(linhas com alternativas, colunas com critérios)

dados <- read.csv("Respondente1_TOPSIS.csv", header=T, sep=";")
dados <- data.matrix(dados)
# Criar vetor com pesos dos critérios, gerados no BWM, para o respondente
BWM <- c(0.0569675723049956, 0.0460122699386503,
0.0460122699386503, 0.0744960560911481,
0.0744960560911481, 0.0744960560911481,
0.0744960560911481, 0.0460122699386503,
0.0460122699386503, 0.0460122699386503,
0.0460122699386503, 0.0460122699386503,
0.0744960560911481, 0.0744960560911481,
0.0744960560911481, 0.0184049079754601,
0.00438212094653812, 0.0460122699386503,
0.0306748466257668)
# Rodar TOPSIS usando a matriz de reposta e o vetor de pesos
resultados <- topsis(dados, BWM, impacts = rep("+", 19))
# Visualizar resultados
resultados
# Exportar resultados para excel
install.packages("writexl")
library("writexl")
write_xlsx(resultados,"C:/Users/Documents/resultados_TOPSIS.xlsx")

```



## APÊNDICE D - *SCRIPT* PARA ANÁLISE DE VARIÂNCIA E TESTES DE HIPÓTESES PARA RESULTADOS DO ESTÁGIO TOPSIS

```

#Instalando pacotes necessários
install.packages("gplots")
install.packages("writexl")
install.packages("PMCMRplus")
install.packages("onewaytests")

# Lendo .csv com Scores (linhas são alternativas, colunas são respondentes)
setwd("C:/Users/João Victor/Resultados Finais")
dados <- read.csv("Scores.csv", sep = ";", header = TRUE, fileEncoding="UTF-
8-BOM")
dados
attach(dados)

# Transformando variável de grupo em fator
dados[,2] <- as.factor(dados[,2])

# Conferindo se o data frame está ok
str(dados)

# Fazendo boxplots e meanplots dos dados
boxplot(Scores ~ Tecnologia, data = dados,
        xlab = "Tecnologias da Indústria 4.0", ylab = "Score TOPSIS",
        frame = FALSE)
# plotmeans
library("gplots")
plotmeans(Scores ~ Tecnologia, data = dados, frame = FALSE,
          xlab = "Tecnologias da Indústria 4.0", ylab = "Score",n.lab = FALSE,
          main="Mean plot com 95% de nível de confiança")

```

```
# Testando a homocedasticidade pelo Teste de Levene (p-valor deve ser maior
do que 0,05 para ser homocedástico)
```

```
library(car)
```

```
leveneTest(Scores ~ Tecnologia, data = dados)
```

```
# Checando a normalidade dos resíduos, fazendo o Q-Q Plot
```

```
plot(res.aov, 2)
```

```
# Extraindo os resíduos do modelo ANOVA
```

```
aov_residuals <- residuals(object = res.aov )
```

```
# Rodando o teste de Shapiro-Wilk
```

```
shapiro.test(x = aov_residuals )
```

```
## Se o p-valor for < 0.05, os dados não apresentam normalidade.
```

```
#
```

```
write_xlsx(pairwisedf6, 'Pairwise - Scores - Conover.xlsx')
```

```
# Teste de Friedman (multiple joint sample)
```

```
## Ex.: Mesmos pacientes são tem urina medida após vários tipos de diurético
```

```
y<-read.csv("Scores-Matriz.csv", sep = ";", header = FALSE,
fileEncoding="UTF-8-BOM")
```

```
y<-as.matrix(y)
```

```
friedman.test(y)
```

```
pairwise9<-posthoc.friedman.conover.test(y=y, p.adjust="fdr")
```

```
pairwise
```

```
pairwisedf <- as.data.frame(pairwise9$p.value)
```

```
write_xlsx(pairwisedf, 'Pairwise - Scores - Friedman pos Conover.xlsx')
```

## APÊNDICE E - QUESTIONÁRIO DA ETAPA BWM-TOPSIS

O questionário mostrado é um exemplo, em que o respondente selecionou a primeira atividade como a melhor (Best) na questão 1, e a segunda como pior (Worst) na questão 3.

### **Survey - Support of Industry 4.0 technologies to production planning and control activities proposed by the Theory of Constraints**

This research aims to assess the potential support of various technologies linked to the phenomenon of Industry 4.0 for the activities of the Drum-Buffer-Rope (DBR) method, as well as its simplified version (S-DBR), and Buffer Management (BM), approaches to production planning and control based on the Theory of Constraints. The research is conducted by João Victor Rojas Luiz, doctoral student in the Graduate Program in Production Engineering (PPGEP) at São Paulo State University, under supervision of Dr. Fernando Bernardi de Souza.

This invitation is due to your professional and/or academic experience with the topics of Theory of Constraints, DBR, S-DBR, BM and Industry 4.0.

Your participation is voluntary, and you have full autonomy to decide whether to participate, as well as withdraw your participation at any time. You will not be penalized in any way if you decide not to consent to your participation, or to withdraw from it. However, it is especially important for the execution of the research. The confidentiality and privacy of the information provided by you will be guaranteed. By answering the questionnaire below and submitting responses, you authorize your participation and consent to the use of the information provided.

If you do not know any of the technologies involved in this research, we provide a glossary to resolve possible doubts at the link:

<https://drive.google.com/drive/folders/1evOS1mKIyDlex9l5TEqxIsWEqyvmbEL?usp=sharing>.

Let us begin by evaluating the various activities that make up the Drum-Buffer-Rope (Classic and Simplified) and Buffer Management methods. First, you will point out the MOST IMPORTANT activity in your view.

1 - Considering the objective of TOC approach to production planning and control (to implement DBR/BM, aiming to increase the gain, and to reduce inventory and/or operational expenses), select the MOST IMPORTANT activity among the alternatives below:

Identify the capacity constraint resource (CCR) (A1)

Establish the Drum in situations of capacity constraint (A2)

Establish the Drum in situations of market constraint (A3)

Establish buffers strategically positioned to protect production and delivery plans against uncertainties (A4)

Dynamically adjust the size of the time buffers according to their consumption (A5)

Dynamically adjust the size of buffers of raw materials and components according to their consumption (A6)

- Dynamically adjust the size of finished products buffers according to their consumption (A7)
- Release material to the factory (Rope) according to the system constraint and with the necessary anticipation determined by the buffer(s) (A8)
- Locate and prioritize orders according to buffer consumption (A9)
- Use buffer management as a source of information for improvement along the supply chain (A10)
- Monitor the loading (utilization level) of resources (A11)
- Manage capacity buffers (A12)
- Allow the use of transfer batches different from processing batches (A13)
- Allow the use of variable processing batches (A14)
- Perform full kitting, checking the availability of all inputs before the production order is released (A15)
- Determine viable delivery dates and support decisions on accepting new orders (A16)

2 - Regarding the activity chosen in the previous question, "Identify the capacity constraint resource (CCR)", answer what its importance is compared to each of the others. Answer using the following scale: 1 (equal importance) to 9 (extremely important).

Establish the Drum in situations of capacity constraint (A2)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Establish the Drum in situations of market constraint (A3)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Establish buffers strategically positioned to protect production and delivery plans against uncertainties (A4)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Dynamically adjust the size of the time buffers according to their consumption (A5)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Dynamically adjust the size of buffers of raw materials and components according to their consumption (A6)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Dynamically adjust the size of finished products buffers according to their consumption (A7)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Release material to the factory (Rope) according to the system constraint and with the necessary anticipation determined by the buffer(s) (A8)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Locate and prioritize orders according to buffer consumption (A9)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Use buffer management as a source of information for improvement along the supply chain (A10)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Monitor the loading (utilization level) of resources (A11)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Manage capacity buffers (A12)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Allow the use of transfer batches different from processing batches (A13)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Allow the use of variable processing batches (A14)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Perform full kitting, checking the availability of all inputs before the production order is released (A15)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Determine viable delivery dates and support decisions on accepting new orders (A16)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Now, you must point out which activity is the LEAST IMPORTANT.

3 - Considering the objective of TOC approach to production planning and control (to implement DBR/BM, aiming to increase the gain, and to reduce inventory and/or operational expenses), select the LEAST IMPORTANT activity among the alternatives below:

Establish the Drum in situations of capacity constraint (A2)

Establish the Drum in situations of market constraint (A3)

Establish buffers strategically positioned to protect production and delivery plans against uncertainties (A4)

Dynamically adjust the size of the time buffers according to their consumption (A5)

Dynamically adjust the size of buffers of raw materials and components according to their consumption (A6)

Dynamically adjust the size of finished products buffers according to their consumption (A7)

Release material to the factory (Rope) according to the system constraint and with the necessary anticipation determined by the buffer(s) (A8)

Locate and prioritize orders according to buffer consumption (A9)

Use buffer management as a source of information for improvement along the supply chain (A10)

Monitor the loading (utilization level) of resources (A11)

Manage capacity buffers (A12)

Allow the use of transfer batches different from processing batches (A13)

Allow the use of variable processing batches (A14)

Perform full kitting, checking the availability of all inputs before the production order is released (A15)

Determine viable delivery dates and support decisions on accepting new orders (A16)

4 – In the previous question, you chose the following activity as the least important: “Identify the capacity constraint resource (CCR)”.

Now, you must compare the activities listed below with this least important activity, using a scale ranging from 1 (equal importance) to 9 (extremely more important).

Establish the Drum in situations of market constraint (A3)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Establish buffers strategically positioned to protect production and delivery plans against uncertainties (A4)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Dynamically adjust the size of the time buffers according to their consumption (A5)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Dynamically adjust the size of buffers of raw materials and components according to their consumption (A6)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Dynamically adjust the size of finished products buffers according to their consumption (A7)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Release material to the factory (Rope) according to the system constraint and with the necessary anticipation determined by the buffer(s) (A8)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Locate and prioritize orders according to buffer consumption (A9)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Use buffer management as a source of information for improvement along the supply chain (A10)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Monitor the loading (utilization level) of resources (A11)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Manage capacity buffers (A12)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Allow the use of transfer batches different from processing batches (A13)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Allow the use of variable processing batches (A14)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Perform full kitting, checking the availability of all inputs before the production order is released (A15)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Determine viable delivery dates and support decisions on accepting new orders (A16)

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9

Next, you will assess the level of support of each Industry 4.0 technology group for DBR and BM activities.

5 - Considering the technology “Simulation/ VR/AR/wearables”, what is the level of support for each activity listed below. Rate the level as very low, low, medium, high, and very high.

Identify the capacity constraint resource (CCR) (A1)

Very low – Low – Medium – High – Very High

Establish the Drum in situations of capacity constraint (A2)

Very low – Low – Medium – High – Very High

Establish the Drum in situations of market constraint (A3)

Very low – Low – Medium – High – Very High

Establish buffers strategically positioned to protect production and delivery plans against uncertainties (A4)

Very low – Low – Medium – High – Very High

Dynamically adjust the size of the time buffers according to their consumption (A5)

Very low – Low – Medium – High – Very High

Dynamically adjust the size of buffers of raw materials and components according to their consumption (A6)

Very low – Low – Medium – High – Very High

Dynamically adjust the size of finished products buffers according to their consumption (A7)

Very low – Low – Medium – High – Very High

Release material to the factory (Rope) according to the system constraint and with the necessary anticipation determined by the buffer(s) (A8)

Very low – Low – Medium – High – Very High

Locate and prioritize orders according to buffer consumption (A9)

Very low – Low – Medium – High – Very High

Use buffer management as a source of information for improvement along the supply chain (A10)

Very low – Low – Medium – High – Very High

Monitor the loading (utilization level) of resources (A11)

Very low – Low – Medium – High – Very High

Manage capacity buffers (A12)

Very low – Low – Medium – High – Very High

Allow the use of transfer batches different from processing batches (A13)

Very low – Low – Medium – High – Very High

Allow the use of variable processing batches (A14)

Very low – Low – Medium – High – Very High

Perform full kitting, checking the availability of all inputs before the production order is released (A15)

Very low – Low – Medium – High – Very High

Determine viable delivery dates and support decisions on accepting new orders (A16)

Very low – Low – Medium – High – Very High

As questões de 6 – 14 são idênticas à questão 5, apenas alterando “Simulation/ VR/AR/wearables” pelas seguintes tecnologias:

Big data and Analytics solutions (T2)

Internet of Things solutions (T3)

Advanced Robotics and automation (T4)

Cloud computing and manufacturing (T5)

Smart production control systems (MES, SCADA, ERP) (T6)

Machine learning and Artificial Intelligence (T7)

Identification and tracking technologies (RFID/QR code/Barcode/GPS) (T8)

Mobile Technologies (T9)

Integrated Engineering Systems for product development and manufacturing (T10)



## APÊNDICE F - QUESTIONÁRIO DA ETAPA QUALITATIVA

This research aims to assess the potential support of various technologies linked to the phenomenon of Industry 4.0 for the activities of the Drum-Buffer-Rope (DBR) - as well as its simplified version (S-DBR) - and Buffer Management (BM) methods, production planning and control approaches based on the Theory of Constraints (TOC). The research is conducted by João Victor Rojas Luiz, doctoral student in the Graduate Program in Production Engineering at São Paulo State University (UNESP), under supervision of Dr. Fernando Bernardi de Souza.

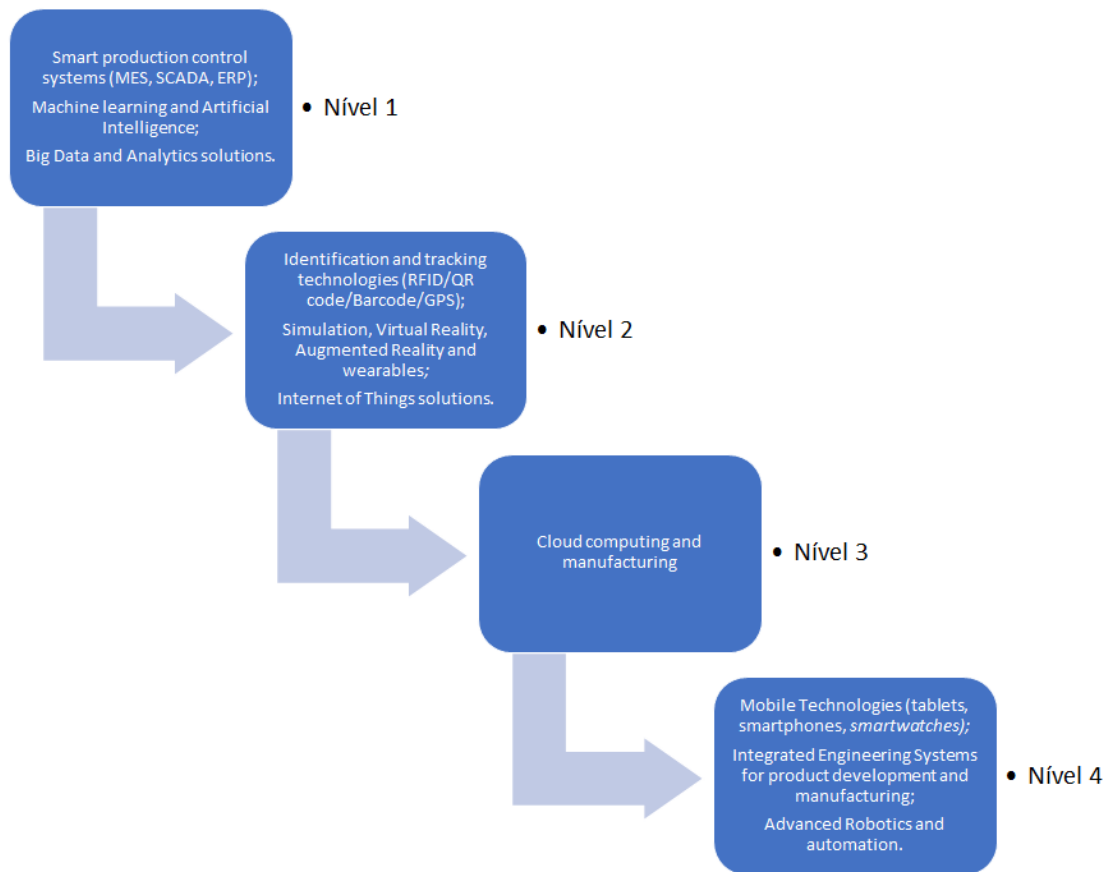
In a first stage of research, a survey was carried out with specialists in TOC, whose opinions were analyzed using multi-criteria decision-making methods (BWM-TOPSIS). In this second stage, it is intended to collect opinions on the results and general views on TOC and Industry 4.0, through open questions.

Your participation is voluntary, and you have full autonomy to decide whether to participate, as well as withdraw your participation at any time. You will not be penalized in any way if you decide not to consent to your participation, or to withdraw from it. However, your participation is especially important for the execution of the research. The confidentiality and privacy of the information provided by you will be guaranteed. By answering the questionnaire below and submitting responses, you authorize your participation and consent to the use of the information provided.

If you are not familiar with any of the technologies involved in this research, we provide a glossary to resolve possible doubts at the link:

<https://drive.google.com/drive/folders/1eyOS1mKIyDlex9l5TExqxlsWEqyvmbEL?usp=sharing>.

When analyzing the responses of 60 TOC specialists on the potential support of different technologies from Industry 4.0 to DBR/BM methods, four technological groups were identified, ordered by level of importance (Level 1 being the most important up to Level 4 being Less important).



On these results, answer the following questions:

1) In your opinion, how could companies looking to implement Industry 4.0 technologies benefit from the Theory of Constraints methods and philosophy?

2) In your opinion, why were MES, SCADA and ERP technologies, machine learning, artificial intelligence, big data, and data analytics identified as those that would most contribute to the activities of Drum-Buffer-Rope and Buffer Management?

3) In your opinion, why mobile technologies (tablets, smartphones, smartwatches), integrated systems for engineering, product development and manufacturing and advanced robotics and automation were identified as those that would least contribute to the activities of Drum-Buffer-Rope and Buffer Management?

4) In general, in your opinion, how can Drum-Buffer-Rope and Buffer Management benefit from the Industry 4.0 digital technologies?