

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MESTRADO PROFISSIONAL EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Eduardo Vieira Ferreira

LEAN E A INDÚSTRIA 4.0: UMA ESTRUTURA CONCEITUAL PARA A ESCOLHA
E VALIDAÇÃO ECONÔMICO- FINANCEIRA DAS TECNOLOGIAS

Porto Alegre

2023

Eduardo Vieira Ferreira

**LEAN E A INDÚSTRIA 4.0: UMA ESTRUTURA CONCEITUAL PARA A ESCOLHA
E VALIDAÇÃO ECONÔMICO- FINANCEIRA DAS TECNOLOGIAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Profissional, na área de concentração em Sistemas de Produção (ou de Qualidade ou de Transportes).

Orientador: Ricardo Augusto Cassel, Ph.D.

Porto Alegre

2023

Eduardo Vieira Ferreira

**LEAN E A INDÚSTRIA 4.0: UMA ESTRUTURA CONCEITUAL PARA A ESCOLHA
E VALIDAÇÃO ECONÔMICO- FINANCEIRA DAS TECNOLOGIAS**

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

Prof. Ricardo Augusto Cassel, Ph.D.

Orientador PMPEP/UFRGS

Prof. Dr. Daniel Sergio Presta Garcia

Coordenador PMPEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professor Dr. Néstor Fabián Ayala (PPGEP/UFRGS)

Professor Dr. Daniel Pacheco Lacerda (PPGEPS/UNISINOS)

Dr. André Cardoso Dupont (Sócio–Diretor Produttore)

*À minha família que está e sempre estará ao
meu lado..*

AGRADECIMENTOS

Todo o processo que envolve um mestrado é bem desafiador, desde as atividades, trabalhos, provas, pesquisas, estudos e dissertação. Para enfrentar todos esses processos de uma forma saudável é necessária uma base sólida e compreensível em muitos momentos, por isso, gostaria de agradecer algumas pessoas importantes que me ajudaram a concluir com sucesso mais esta etapa muito importante na minha vida.

Agradeço a Deus por permitir que finalizasse mais este desafio, estando comigo mesmo que eu não possa vê-lo, permitindo que eu tenha saúde e força.

Agradeço aos meus pais, por sempre me mostrarem a importância dos estudos, incentivarem a buscar conhecimento e a nunca desistir nos momentos difíceis.

Agradeço a minha companheira Kamila que sempre teve paciência e compreensão na minha ausência em momentos de lazer e também por sempre acreditar no meu potencial e me incentivar nesta caminhada.

Agradeço também a minha irmã, meu cunhado e minha sobrinha por completarem essa base sólida em minha vida, que faz com que as coisas fiquem mais leves.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ricardo A. Cassel, pelo conhecimento compartilhado nas aulas e principalmente no desenvolvimento deste trabalho, sua visão sistêmica dos diversos conceitos fizeram com que as análises e comentários fossem sempre de alto nível. Espero que possamos manter o contato e que eu continue o tendo como meu mentor.

Agradeço à UFRGS, pela oportunidade de me desenvolver e aos demais professores pelo alto nível de conhecimento compartilhado, com eles pude absorver e me tornar um profissional melhor.

Por fim, agradeço a empresa e aos meus gestores Felipe Mandelli e Jeferson Fenner que me deram apoio desde o início do processo de inscrição até a finalização do trabalho.

RESUMO

A quarta revolução industrial ou Indústria 4.0 (I4.0) tem como objetivo conectar os mundos físico e virtual na produção industrial por meio da integração de tecnologias. O aumento de pesquisas e a alta velocidade da aplicação e integração dessas tecnologias podem consolidar as inúmeras oportunidades encontradas. Com a I4.0 em andamento, surgem as reflexões quanto ao papel do Lean e uma abordagem amplamente encontrada nas pesquisas é que as empresas que já utilizam o Lean podem ter as suas boas práticas potencializadas por essas tecnologias da I4.0. Outra abordagem, cita que as empresas que ainda não possuem o Lean podem utilizar as tecnologias da I4.0 para dar visibilidade às oportunidades e ter clareza por onde começar a sua implementação. Mesmo com estas abordagens, as empresas ainda não têm total clareza em como utilizar o Lean com as tecnologias da I4.0. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma estrutura conceitual que tem como etapa principal realizar a conexão das tecnologias da I4.0 em relação às perdas do Lean e como estes conceitos se conectam. Como parte da estrutura desenvolvida, foram incorporados conceitos da Teoria das Restrições, buscando focar as melhorias em pontos restritivos do sistema, e de avaliação de viabilidade econômica financeira dos investimentos, buscando validar economicamente as melhorias propostas. Para o atingimento do objetivo proposto, a pesquisa utilizou a *Design Science Research*, e foi utilizado um grupo focal para a melhoria e avaliação do artefato. Como resultados, 18 tecnologias da I4.0 puderam ser inseridas dentro de cada uma das 8 perdas do Lean conforme sua utilização e impacto na busca pela redução ou eliminação. Por fim, a versão final da estrutura conceitual considerou a aplicação da TOC como orientadora por meio das 5 etapas da focalização e poderá contribuir para que as empresas entendam e apliquem melhor os conceitos.

Palavras-chave: Lean. Perdas. Indústria 4.0. Tecnologias. Estrutura conceitual

ABSTRACT

The Fourth Industrial Revolution or Industry 4.0 (I4.0) has as its goal to connect the physical and virtual worlds in the industrial production by means of integration of technologies. The increase of researches and high speed of application and integration of these technologies may consolidate the innumerable opportunities found. With I4.0 in progress, several reflections come up as to the role of Lean and an approach vastly found in researches is that the companies that already use Lean may have their good practices maximized by these I4.0 technologies. Another approach states that the companies that do not yet possess Lean may use I4.0 technologies to shed light to opportunities and have clarity as to where to start its implementation. Even with these approaches, the companies still do not have complete clarity as to how to use Lean with I4.0 technologies. In this sense, the goal of this work is to develop a conceptual structure that has as its main step the connection of I4.0 technologies in relation to the Lean wastes and how these concepts connect with each other. As part of the developed structure, concepts of the Theory of Constraints were incorporated, seeking to focus on the improvements of restrictive aspects of the system, and the evaluation of the financial and economic viability of the investments, trying to validate economically the improvements proposed. In order to achieve the proposed objective, the research made use of a Design Science Research, and a focal group was used for the improvement and evaluation of the artifact. As a result, 18 technologies of I4.0 were able to be inserted into each one of the 8 wastes of Lean according to their use and impact in the search for reduction or elimination. Finally, the final version of the conceptual structure considered the application of TOC as a guide through the 5 steps of focalization and it will be able to contribute in such a way that the companies may understand and better apply the concepts.

Key words: Lean.Wastes. Industry 4.0. Technologies. Conceptual Structure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Possível aumento da produtividade com a integração do Lean e I4.0.....	16
Figura 2: Estratégia para condução de pesquisa.....	23
Figura 3: Estrutura para condução da pesquisa.....	26
Figura 4: Casa do Sistema Toyota de Produção.....	34
Figura 5: Modelo Y de Scheer para I4.0.....	45
Figura 6: Modelo Acatech.....	48
Figura 7: Modelo conceitual de Transformação Digital e as quatro inteligências da Indústria 4.0.....	51
Figura 8: Tecnologias centrais da I4.0.....	55
Figura 9: Tecnologias facilitadoras da I4.0.....	56
Figura 10: Perdas do Lean.....	75
Figura 11: Tecnologias da I4.0.....	77
Figura 12: Conexão entre perdas e tecnologias da I4.0.....	78
Figura 13: Perda de transporte x tecnologias da I4.0.....	80
Figura 14: Perda de movimentação x tecnologias da I4.0.....	81
Figura 15: Perda de defeitos x tecnologias da I4.0.....	82
Figura 16: Perda de superprodução x tecnologias da I4.0.....	83
Figura 17: Perda de super processamento x tecnologias da I4.0.....	83
Figura 18: Perda de estoque x tecnologias da I4.0.....	84
Figura 19: Perda de espera x tecnologias da I4.0.....	85
Figura 20: Perda intelectual x tecnologias da I4.0.....	86
Figura 21: Resumo perdas x tecnologias.....	86
Figura 22: Estrutura conceitual.....	89
Figura 23: Etapas de implementação.....	92
Figura 24: Estrutura conceitual final.....	114

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Participantes do grupo focal	29
Quadro 2: Etapas conduzidas com o grupo focal	31
Quadro 3: Aplicação das ferramentas do pensamento enxuto nas perdas	42
Quadro 4: Tecnologias do <i>Smart Manufacturing</i>	53
Quadro 5: Tecnologias do <i>Smart Products</i>	53
Quadro 6: Tecnologias do <i>Smart Supply Chain e Smart Working</i>	54
Quadro 7: Assuntos e análises realizadas	93
Quadro 8 Síntese do grupo focal	110
Quadro 9: Etapas da TOC x Etapas da estrutura conceitual.....	112

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.2	OBJETIVOS	17
1.3	JUSTIFICATIVA	17
1.4	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	20
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	METODOLOGIA	22
2.1	MÉTODO DO TRABALHO	25
2.2	GRUPO FOCAL	28
2.2.1	Planejamento do grupo focal	28
2.2.2	Condução do grupo focal	30
2.2.3	Análise dos dados	32
3	REFERENCIAL TEÓRICO	33
3.1	SISTEMA TOYOTA DE PRODUÇÃO E O LEAN	33
3.1.1	Perdas	35
3.1.2	Logística Interna Lean	37
3.1.3	Os 3 R's da logística interna	38
3.1.4	Pensamento enxuto (<i>Lean Thinking</i>)	39
3.1.5	Relação entre ferramentas e perdas	41
3.2	MODELOS DA INDÚSTRIA 4.0	44
3.2.1	Modelo Scheer	44
3.2.2	Modelo Acatech	47
3.2.2.1	Informatização	48
3.2.2.2	Conectividade	48
3.2.2.3	Visibilidade	49
3.2.2.4	Transparência	50
3.2.2.5	Capacidade Preditiva	50
3.2.2.6	Adaptabilidade	51
3.2.3	Modelo 4 Smarts	51
3.2.3.1	<i>Smart Manufacturing e Smart Products</i>	52
3.2.3.2	<i>Smart Supply Chain e Smart Working</i>	54
3.3	TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 E SEUS BENEFÍCIOS	55
3.3.1	Big Data e analytics	56
3.3.2	IOT E IIOT	57
3.3.3	Inteligência Artificial	58
3.3.4	RFID	58
3.3.5	<i>Cloud Computing</i>	59
3.3.6	AR e VR	60
3.3.7	Robôs colaborativos	61
3.3.8	<i>Wearables</i>	61
3.3.9	Exoesqueletos	62
3.3.10	Comunicação máquina a máquina (M2M)	63
3.3.11	Sistemas de visão	64

3.3.12 Veículos autoguiados (AGV/AMR)	65
3.3.13 Simulação	65
3.3.14 Integração vertical.....	66
3.3.15 Sistemas ciber-físicos	67
3.4 TOC – 5 ETAPAS DE FOCALIZAÇÃO	67
3.5 VALIDAÇÃO ECONÔMICO FINANCEIRA.....	69
4 PROPOSTA DA ESTRUTURA CONCEITUAL	74
4.1 O LEAN E A INDÚSTRIA 4.0	74
4.2 PERDAS X TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0.....	79
4.3 ESTRUTURA CONCEITUAL – LEAN DIGITAL	87
4.4 ETAPAS DE IMPLEMENTAÇÃO	89
4.4.1 Etapas da Focalização - TOC	89
4.4.2 Conexão entre as perdas e tecnologias	90
4.4.3 Validação econômico-financeira.....	91
5 VALIDAÇÃO DA ESTRUTURA CONCEITUAL	93
5.1 ANÁLISE DO GRUPO FOCAL	93
5.1.1 Análise do grupo focal: Introdução ao Lean Digital.....	94
5.1.2 Análise do grupo focal: 8 Perdas do Lean.....	95
5.1.3 Análise do grupo focal: I4.0, tecnologias de base e front.....	96
5.1.4 Análise do grupo focal: I4.0, relação das tecnologias em cada perda	99
5.2 SÍNTESE DO GRUPO FOCAL	109
5.3 ESTRUTURA CONCEITUAL FINAL	111
5.3.1 Estrutura revisada.....	111
6 CONCLUSÃO	115
REFERÊNCIAS	118

1 INTRODUÇÃO

Devido à redução das barreiras comerciais e ao rápido crescimento das novas tecnologias, houve um aumento significativo na competição das organizações em praticamente todos os segmentos de mercado nas últimas décadas. Nesse ambiente, as empresas devem buscar constantemente estratégias que proporcionem vantagens competitivas em seus locais de atuação ou correm o risco de ter sua sobrevivência ameaçada pelos concorrentes. Dentre as estratégias existentes que podem alavancar os resultados das empresas buscando a sinergia com estas novas tecnologias está o Lean que pode ser utilizado nas melhorias de produtos ou processos, objetivando aumentar a receita, bem como, aumentar a qualidade, a produtividade e atender seus clientes de forma mais eficiente à medida que o mercado muda rapidamente e a concorrência se intensifica.

O impacto global do sistema de gestão e produção da Toyota no mundo de hoje já se mostrou muito importante. O Sistema Toyota de Produção (STP) é a base para a chamada gestão “enxuta” ou Lean. Alguns dos princípios orientadores para a sua implementação estão diretamente ligados à interação humana no processo de fabricação e a adoção de uma mentalidade de melhoria contínua (LIKER,2022, LIMA,2018). O STP foi idealizado e sua implementação começou logo após a Segunda Guerra Mundial, mas ele não tinha atraído a atenção da indústria japonesa até a primeira crise do petróleo no outono de 1973. Os gerentes japoneses, acostumados à inflação e às altas taxas de crescimento, se viram confrontados com crescimento zero e forçados a lidar com decréscimos de produção. Foi durante esta emergência econômica que eles notaram, pela primeira vez, os resultados que a Toyota estava conseguindo com a sua implacável perseguição à eliminação das perdas (OHNO,1999, LIKER,2022, GAYER, 2019).

O Lean ganhou reconhecimento como uma estratégia de fabricação usada por várias empresas ao redor do mundo. Outras indústrias, incluindo saúde, construção, logística, bancos e telecomunicações, também adotaram os princípios Lean. Com o aumento da concorrência entre as organizações em função dos avanços da tecnologia, das políticas empresariais e dos hábitos de consumo, a utilização de práticas que possibilitem a melhoria contínua dos indicadores de produção se tornou um diferencial para as empresas (SANTOS *et al* 2021, WAGNER *al.*, 2017, LIKER 2022).

No contexto atual, outra abordagem que tem sido explorada pelas empresas na busca pela melhoria contínua é o entendimento e aplicação das tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0). A I4.0 tem sido considerada um novo estágio industrial em que várias tecnologias emergentes estão convergindo para fornecer soluções digitais. O termo foi lançado em 2011 pelo governo alemão formado por cientistas e representantes da indústria. Por sua origem, o conceito se caracterizou não apenas como um avanço tecnológico, mas também como uma forte afirmação política com o objetivo de manter a "posição de liderança na indústria de engenharia de manufatura" da Alemanha. Este termo foi globalmente utilizado na última década (XUN XU, *et al* 2021, KAGERMANN *et al*, 2013). A I4.0 não é uma tecnologia única, mas um conceito sociotécnico em que interagem aspectos tecnológicos, sociais e organizacionais. (BEIER *et al.*, 2020). Muitas empresas de grande e médio porte começaram a usar características da I4.0 implementando tecnologias modernas para melhorar a qualidade de materiais, o gerenciamento de materiais, os processos de fabricação e as redes da cadeia de suprimentos.

Tanto o Lean quanto a I4.0 enfatizam a melhoria do processo e o aumento de eficiência, mas não consideram um ao outro em sua implementação. O Lean pode ser capaz de suportar a ascensão da I4.0 e conviver com a tecnologia que a impulsiona, bem como, algumas soluções Lean podem ser necessárias para garantir que as tecnologias da I4.0 funcionem e coexistam. WAGNER *al.*, 2017; AMMAR *et al.*, 2021, TORTORELLA *et al.* 2020, DAVIS *et al* 2020). Embora uma visão de consenso possa estar surgindo, muito desse discurso permanece de natureza conceitual e carece de confirmação empírica (CIFONE *et al* 2021, TORTORELLA *et al.* 2019, SONY, 2018). Corroboram Frank *et al* (2019), afirmando que há uma falta de compreensão de como as empresas implementam essas tecnologias. Sendo assim, identificar a conexão das tecnologias da I4.0 com as perdas do Lean e seus benefícios, bem como, os fatores que influenciam esse processo de implementação, é de suma importância para que as empresas entendam os desafios que estão inseridas.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

À medida que a globalização avança, as indústrias são confrontadas com ambientes dinâmicos e desafiadores. Atualmente, as empresas estão sendo influenciadas por uma série de impulsionadores de transformação que, ao mesmo tempo, apresentam

desafios cada vez mais difíceis. Além de fatores gerais, como a globalização, que testa constantemente a competitividade de uma empresa e a customização de produtos que exige um alto nível de adaptabilidade nos sistemas de manufatura, novos drivers como a I4.0 estão surgindo como oportunidades para acelerar a tomada de decisão, bem como, apoiar e capacitar os funcionários. Por fim, as empresas enfrentam a necessidade de maior produtividade a custos mais baixos, e junto a isso, uma maior participação do cliente no desenvolvimento dos seus produtos.

Para o desenvolvimento deste trabalho será utilizado o termo Lean Digital para a integração entre o Lean e a I4.0, porém, outro autor tem assumido algumas definições como o Lean 4.0 e o Lean *Automation*. O Lean 4.0 está ganhando força entre acadêmicos e profissionais (CIFONE E STAUDACHER, 2022; JAVAID *et al*, 2021). Já para Deloitte (2020), as tecnologias digitais e os princípios Lean estão se conectando no que é comumente chamado de “Lean Digital” – que pode ser uma poderosa combinação de princípios Lean e tecnologias digitais em constante evolução para diminuir a perda e variabilidade nos processos. O Lean Digital usa a I4.0 e outras ferramentas digitais para fornecer informações mais precisas e oportunas sobre as operações, isso não apenas aumenta o impacto das ferramentas, mas também ajuda a concretizar os princípios Lean.

O objetivo de longo prazo do Lean 4.0 é reduzir os custos operacionais e entregar produtos de alta qualidade. Esses métodos ajudam a acelerar a proposta de valor da empresa, melhorando as operações, engajando os funcionários e agilizando a comunicação. Além disso, regula o custo de produção, permitindo maior flexibilidade dos funcionários. Isso abre novos caminhos de carreira, tanto em termos de desenvolvimento pessoal quanto na produção de mais valor nos processos organizacionais existentes para melhorar o valor do cliente. A conectividade do Lean 4.0 permite escolhas baseadas em dados “online” e tomadas de ação ágil em busca da melhoria contínua (JAVAID *et al*, 2021).

A quarta revolução industrial resultou na implementação da I4.0 pelas principais organizações e o Lean é uma das estratégias de negócios mais utilizadas nas últimas três décadas. A integração de subsistemas hierárquicos dentro de uma organização deve possuir uma estratégia bem pensada para atingir os objetivos estratégicos. O Lean pode ser usado como um guia para planejar uma estratégia de integração. Esse alinhamento

entre o Lean e da I4.0 agregará valor ao cliente e garantirá que os recursos integrados sejam usados em todo o seu potencial (SONY, 2018).

A pesquisa realizada por Saxby e Viza, destacou que o método Lean pode integrar novas tecnologias, para permitir melhor suporte à melhoria contínua no mundo da I4.0 (SAXBY E VIZA, 2020). Ainda neste contexto Tortorella *et al*, (2020) promoveram um estudo que fornece evidências de uma relação sinérgica entre as tecnologias da I4.0 e as práticas do Lean, indicando que a coexistência de ambas as abordagens não é conflitante. Por fim, Rossini *et al*, (2019) realizaram um estudo em 108 fabricantes europeus e concluíram que para atingir níveis de satisfação da I4.0 precisam implementar primeiramente práticas do Lean, com isso, obtendo processos robustos e bem desenhados, as empresas poderão se beneficiar das aplicações das tecnologias.

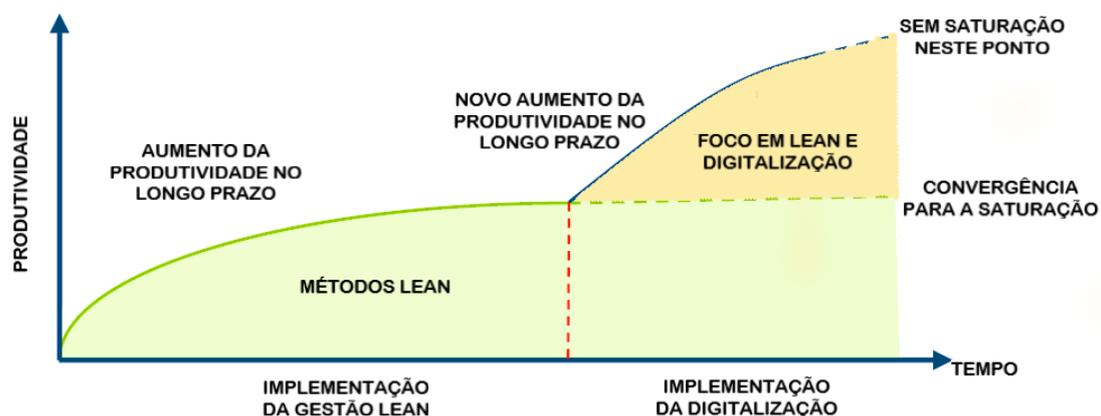
A transição da I4.0 requer a integração organizacional de muitas tecnologias modernas baseadas em TI e a digitalização de cadeias de valor inteiras. No entanto, a transição da I4.0 para empresas menores pode começar com a digitalização de certas áreas de operações em apoio às principais estratégias organizacionais. O desenvolvimento de um sistema de manufatura digital enxuto é uma estratégia de negócio viável para a sobrevivência corporativa no cenário da I4.0 (GHOBAKHLOO, M. AND FATHI, M.; 2020).

Os conceitos de Lean e I4.0 parecem ser complementares, pois ambos fornecem aos gestores das operações informações sobre como aumentar a eficiência da produção. O Lean 4.0 é a próxima geração do Lean e visa atualizar a abordagem tradicional consagrada pelo tempo, com a transformação digital da I4.0. Este novo Lean 4.0 responde às crescentes solicitações de customização e aos melhores prazos de entrega devido às expectativas dos clientes. A flexibilidade, eficiência e produtividade de uma empresa podem ser aprimoradas em mudanças simples, como mudar as instruções de trabalho em papel para o formato digital, com isso, é possível também economizar custos com pouco ou nenhum ajuste cultural. A eficiência das fábricas pode ser aumentada de 10% a 15% ao incorporar o trabalho digital em suas linhas de produção e levar a uma redução nos custos operacionais (JAVAID *et al* 2021).

Os autores Prinz *et al*, (2018) afirmam que a implementação da I4.0 considera a necessidade de organização e padronização dos processos existentes, com isso, a

utilização do Lean suporta a aplicação com maior eficácia das tecnologias da I4.0, e pode-se alcançar desempenhos ainda maiores de produtividade. Em contrapartida, considerar apenas a utilização de tecnologias em processos que não possuem padrões ou fluxo definido pode acarretar em resultados abaixo da expectativa. Na figura 01 é ilustrado o pensamento abordado pelos autores.

Figura 1: Possível aumento da produtividade com a integração do Lean e I4.0



Fonte: Adaptado de Prinz *et al* 2018.

As empresas precisam minimizar os desafios na adoção dessas abordagens, bem como, identificar e maximizar os potenciais benefícios que podem ser alcançados quando elas são devidamente integradas. Ao adotar uma abordagem integrada, as empresas podem obter uma vantagem competitiva, alcançando maior eficiência, flexibilidade e qualidade em seus processos de produção. As empresas que iniciaram a sua jornada com o Lean precisam de diretrizes sobre como integrar as novas tecnologias da Indústria 4.0 em seus sistemas de produção. Porém, o conhecimento necessário para realizar essa integração ainda é insuficiente (BUER; STRANDHAGEN; CHAN, 2018).

Corroborando com esta afirmação, Pereira *et al*, (2019) comentam que muitos erros foram cometidos ao longo dos anos com diferentes tecnologias, criando muitos problemas em muitas empresas. Os princípios e conceitos Lean devem ser muito bem compreendidos para tirar proveito efetivo dessas novas tecnologias. Sendo assim, como relacionar a implementação das tecnologias da I4.0 por meio das perdas do Lean, considerando etapas que auxiliem o ganho sistêmico e permitam os benefícios econômico-financeiros?

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma estrutura conceitual que auxilie as empresas na implementação e validação dos ganhos do Lean Digital com foco na manufatura, por meio da definição da restrição do sistema, a conexão das perdas do Lean com as tecnologias da I4.0 e a análise econômico-financeira.

Como objetivos específicos espera-se:

- Identificar e classificar as tecnologias que podem trazer benefícios na redução ou eliminação das perdas do Lean;
- Analisar os modelos de I4.0 existentes na literatura para identificação de componentes relevantes a serem incorporados na estrutura conceitual proposta;
- Identificar métodos para validação econômico-financeira que podem ser utilizados na avaliação de projetos de tecnologias;

1.3 JUSTIFICATIVA

O Lean manterá sua importância e eficácia dentro das organizações porque engloba o foco no cliente, a criação de valor, a eliminação das perdas e outros conceitos importantes para as empresas. As tecnologias existentes na Indústria 4.0 e suas aplicações facilitarão a realização e aplicação dos conceitos e princípios do Lean. Pode-se pensar que, com o surgimento da Indústria 4.0, este será o fator mais importante para o sucesso da produção das chamadas "fábricas do futuro", mas, ao contrário do que muitos pensam, o uso intensivo de tecnologias e equipamentos avançados não será suficiente para garantir a eficiência necessária (DOMINGUES *et al* 2019). Quando o Lean Digital é aplicado corretamente, as organizações podem esperar benefícios econômicos e melhoria de qualidade, o que levará ao aumento da produtividade e a um maior retorno sobre o investimento quando comparado a projetos isolados de melhoria digital ou tradicional (DELOITTE, 2020).

Ainda há a necessidade de maior conhecimento sobre os benefícios que o Lean 4.0 pode trazer para o desempenho dos negócios, bem como, seu espaço efetivo de aplicação (CIFONE E STAUDACHER, 2022). Outro ponto importante a ser citado é que a grande maioria dos trabalhos se preocupa em mostrar o impacto das ferramentas

da I4.0 em relação às ferramentas do Lean. Poucos trabalhos comentam os impactos das tecnologias e seus benefícios na eliminação das perdas, que continua sendo um dos principais objetivos do Lean.

No trabalho desenvolvido por Valamede e Akari (2020), foi proposta a integração de ferramentas Lean e tecnologias da I4.0. As tecnologias consideradas foram *Big Data Analytics*, *AGV's*, *Cloud Computing*, Simulação Virtual e Realidade Aumentada (AR). Em relação ao Lean a análise partiu considerando o *Just in time (JIT)*, *Kaizen*, *Kanban*, *Poka-Yoke*, Mapeamento do Fluxo de Valor (MFV) e Manutenção Produtiva Total (TPM). A partir desta integração das tecnologias com as ferramentas Lean, os autores trazem uma nova abordagem que denominaram como *JIT 4.0*, *Kaizen 4.0*, *Kanban 4.0*, *Poka-Yoke 4.0*, *MFV 4.0* e *TPM 4.0*.

Neste mesmo sentido, Pagliosa *et al*, (2021) analisaram nove tecnologias da I4.0 sendo elas, Internet das coisas, Sistemas Ciber Físicos, *Cloud Computing*, *Big Data*, Integração vertical/horizontal, robótica avançada, AR, Simulação e Manufatura aditiva e seus impactos em quatorze práticas do Lean, citando o *Kanban*, Mapeamento do Fluxo de Valor, *Poka-Yoke*, *Kaizen*, Produção puxada, *Andon*, Troca rápida de ferramentas, Padronização, Gestão da qualidade total, *Takt time*, *Heijunka*, *5S*, *Jidoka* e TPM. Das 126 relações possíveis, 24 delas foram classificadas como de alta sinergia, com isso, é possível sugerir uma priorização em sua implementação. Já no trabalho de Cifone *et al* (2021), é realizado um estudo mostrando as ligações com maior impacto entre as tecnologias da I4.0 e as 8 perdas do Lean, porém eles limitam o estudo em somente 6 tecnologias da I4.0. Outro ponto importante a ser citado é que os autores não aprofundam ou sugerem uma estrutura de priorização da implementação, bem como, uma etapa de validação econômico-financeira das tecnologias.

A utilização da Teoria das Restrições na priorização de processos para a implementação do Lean Digital contribui para a maximização dos resultados. Ao focar nos processos restritivos, as empresas podem obter melhorias significativas no desempenho, aumentando a eficiência e a capacidade produtiva. Além disso, as empresas podem direcionar seus esforços para as áreas que mais impactam suas metas estratégicas. Por fim, a alocação de investimento é otimizada, evitando investimentos desnecessários em áreas ou processos que não proporcionam ganhos expressivos. No trabalho de Kuo *et al* (2021) foi desenvolvido um sistema de para melhoria no

desempenho de entrega com base na teoria das restrições. O trabalho propôs a aplicação de tecnologias da I4.0 para gestão de estoque e tomadas de ação mais eficazes. O conceito além de trazer a aplicação de tecnologias para melhorar a comunicação com o fornecedor também considera o monitoramento e controle das restrições para garantir que os prazos acordados com os clientes sejam efetivados.

A validação econômico-financeira desempenha um papel fundamental na implementação do Lean Digital, proporcionando uma análise criteriosa dos aspectos financeiros relacionados às oportunidades encontradas nas perdas que podem ser potencializadas pelas tecnologias da I4.0. Com a rápida evolução tecnológica e o aumento de opções disponíveis, a validação econômico-financeira auxilia na aprovação de soluções rentáveis. Além disso, a validação econômico-financeira ajuda a mitigar riscos e incertezas, fornecendo uma visão clara dos impactos financeiros e da viabilidade de longo prazo dessas tecnologias. Como resultado, as empresas podem adotar estratégias mais eficazes na implementação do Lean Digital, impulsionando o crescimento sustentável. Sendo assim, por mais que exista uma relação entre as tecnologias da I4.0 e as perdas do Lean no trabalho de Cifone *et al* (2021), falta uma estrutura e elementos que possam orientar as empresas no início de sua implementação e na validação dos ganhos, que podem inclusive, garantir o desdobramento de novas implementações.

Considerando a relevância deste assunto para os próximos anos e o impacto positivo que estudos neste campo de atuação podem auxiliar, identificou-se a oportunidade de construção de uma estrutura que possa ser utilizada pelas empresas, onde seja possível mostrar a conexão das tecnologias da I4.0 nas perdas do Lean. O método abordado nesta pesquisa leva em conta a oportunidade encontrada na limitação dos trabalhos analisados até o momento, oportunizando uma abrangência maior de tecnologias analisadas da I4.0 que é possibilitada também pelo avanço de outras pesquisas com objetivos semelhantes. Além disso, complementar a análise considerando uma etapa de focalização por meio da Teoria das restrições (TOC) e uma etapa de validação econômico-financeira para as tecnologias. Por fim, o método tem como característica analisar as conexões da Indústria 4.0 nas perdas, dessa forma, esse estudo se justifica por apresentar uma proposta de método que poderá ser utilizado por qualquer empresa como ferramenta de apoio à implementação do Lean Digital.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho detalha a conexão das tecnologias da I4.0 e as perdas do Lean, ou seja, não considera estudos e possíveis impactos negativos entre os dois assuntos. O trabalho também tem o objetivo de apresentar as conexões dos demais assuntos, com isso, cabe salientar que não é objetivo deste trabalho analisar a esfera estratégica que envolve a estrutura proposta, partindo do pressuposto que, essa análise já é realizada pelas empresas.

Outra delimitação do trabalho é referente aos impactos da I4.0 no desenvolvimento de produtos, cadeia de suprimentos e serviços, também conhecido como integração horizontal e de ponta a ponta. Neste trabalho serão abordados somente os impactos na manufatura. Essa delimitação é importante, visto os benefícios também encontrados nessas outras integrações. Além disso, o trabalho não abordará a maturidade de cada tecnologia, conhecimentos, dificuldades, leis ou infraestrutura necessária para a sua implementação.

O trabalho não irá detalhar qual o melhor caminho de validação econômico-financeira para as tecnologias e sim a sua importância, além disso, não será considerado os tipos de custeio que podem estar envolvidos. Este trabalho limita-se também à descrição da estrutura conceitual e a demonstrar quais as tecnologias tem conexões em cada uma das perdas, sem a devida aplicação em uma organização. Além disso, não é objetivo do trabalho ser exaustivo nas relações e benefícios entre as perdas do Lean e as tecnologias da I4.0, podendo assim, existir outras relações que não estão sendo citadas neste trabalho. Como validação da estrutura conceitual será utilizado um grupo focal que por meio de entrevistas serão validados os seus elementos e a futura aplicabilidade nas organizações.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, no capítulo um é apresentada uma contextualização, que consta a introdução, o problema de pesquisa, os objetivos e a justificativa, ainda no capítulo um se define as delimitações do trabalho buscando o alinhamento das expectativas. O capítulo dois consta com as definições metodológicas deste trabalho utilizando-se de uma pesquisa aplicada com abordagem qualitativa. Além disso, o método de pesquisa utilizado é o *Design Science Research*, pois é o método

utilizado quando o objetivo é a construção de um artefato, por fim, o grupo focal é apresentado.

No capítulo três é apresentado o referencial teórico dos assuntos relacionados a TOC, Lean, I4.0 e validação econômico-financeira buscando evidenciar seus conceitos. Junto a isso, detalha-se alguns pontos importantes dentro dos assuntos citados, como as perdas do Lean, os modelos existentes na indústria 4.0 e os conceitos que podem ser utilizados na validação econômico-financeira.

No capítulo quatro, a estrutura conceitual é apresentada. A seção apresenta os elementos contidos na estrutura, sendo eles a TOC, o Lean, as tecnologias da I4.0 e a validação econômico-financeira, bem como, demonstra as etapas de implementação. Já no capítulo 5 se realiza a validação da estrutura conceitual junto ao grupo focal contemplando os principais conceitos da estrutura, sendo eles, as 8 perdas do Lean, classificação em base e *front end* das tecnologias da I4.0, a relação das tecnologias em cada perda e a validação econômico-financeira. Por fim, se apresenta a estrutura conceitual final, considerando as contribuições sugeridas pelo grupo focal. No capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho contendo as contribuições realizadas, as limitações identificadas e as sugestões de trabalhos futuros, se lista também as referências bibliográficas utilizadas.

2 METODOLOGIA

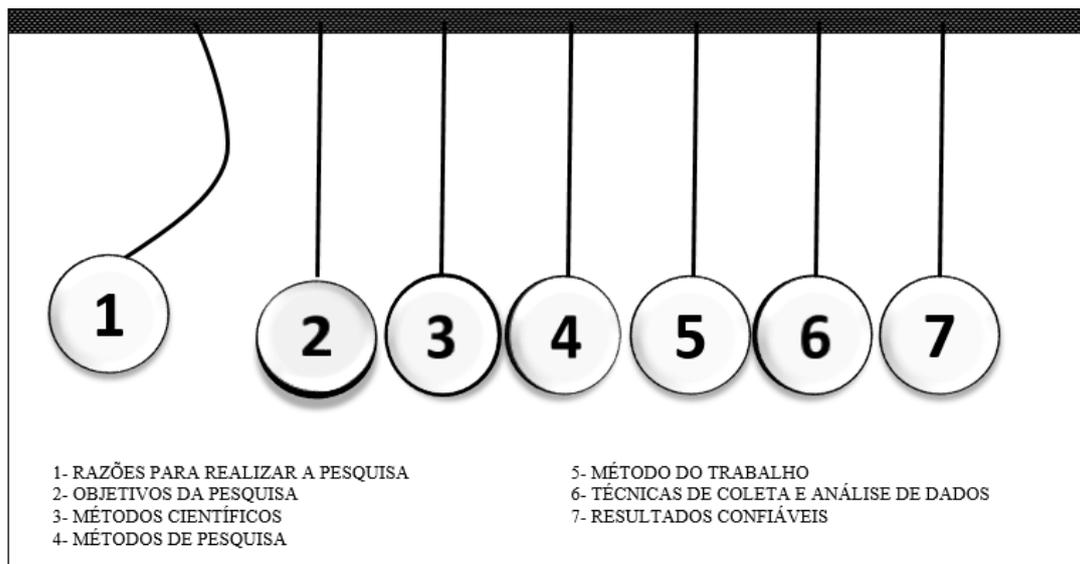
A Pesquisa pode ser definida como uma investigação sistemática cujo objetivo principal é geralmente o desenvolvimento ou refinamento de teorias, bem como, em alguns casos, a resolução de problemas. Muitas vezes, a pesquisa é necessária devido à falta de informações adequadas e sistematizadas para responder a um problema específico (DRESCH *et al* 2020). Neste mesmo sentido, Gil (2022) afirma que uma pesquisa pode ser definida como um processo racional e sistemático com o objetivo de fornecer soluções para os problemas que estão sendo propostos. Um estudo é necessário quando não há informações suficientes para responder a um problema ou quando as informações disponíveis não podem ser adequadamente relacionadas à situação.

As motivações para a realização de um estudo podem ser teóricas ou práticas. Pesquisa básica, ou pesquisa pura, caracteriza-se por um caráter mais teórico e tem como objetivo primordial o avanço da ciência sem levar em conta a aplicação do conhecimento prático, este é o tipo de pesquisa feita nas universidades. Pesquisa de ordem prática, muitas vezes conhecida como pesquisa aplicada, tem como objetivo primordial auxiliar os profissionais na resolução de problemas do dia-a-dia. Apesar de suas diferenças, as pesquisas básicas e aplicadas não são excludentes (DRESCH *et al* 2020 e GIL, 2022).

Para o desenvolvimento de uma pesquisa, é importante seguir alguns procedimentos que garantam a confiabilidade dos resultados. A Figura 2, apresenta a estrutura proposta por DRESCH *et al*, (2020) e que será utilizada neste trabalho. Conforme a imagem, a estrutura é composta por sete etapas que serão detalhadas a seguir.

Como primeira etapa, as razões para realizar a pesquisa foram detalhadas na introdução deste trabalho. Os trabalhos recentes mostram os benefícios da implementação de tecnologias e os impactos em ferramentas da melhoria contínua, porém, falta clareza no entendimento de quais são os benefícios relacionados à eliminação das perdas da melhoria contínua que continua sendo um dos principais motivos de sua origem.

Figura 2: Estratégia para condução de pesquisa



Fonte: Adaptado de Dresch *et al* (2020)

A segunda etapa da estrutura é referente aos objetivos da pesquisa. O objetivo é propor uma estrutura conceitual que busque as conexões das tecnologias da I4.0 nas perdas do Lean, além disso, utilizar a TOC para direcionar o foco da implementação da oportunidade encontrada, bem como, uma etapa de validação econômico-financeira para as tecnologias a serem implementadas. A terceira etapa, relacionada ao método científico, é conceituado por Gil (2022) como um conjunto de diretrizes fundamentais para conduzir uma investigação com o objetivo de gerar novos conhecimentos ou corrigir e integrar conhecimentos existentes. Como resultado, um método científico pode ser definido como um conjunto de etapas utilizadas para obter um resultado confiável, ou seja, livre da subjetividade do pesquisador e o mais próximo possível da objetividade empírica. Para Dresch *et al*, (2020) o método científico é um ponto de vista ou suposição sobre como o conhecimento é construído. A abordagem ou método científico utilizado em um estudo deve levar em consideração fatores relacionados ao ponto de partida da pesquisa e o seu objetivo.

Esses métodos esclarecem os procedimentos lógicos que devem ser seguidos na investigação científica dos fenômenos naturais e sociais. Assim, métodos desenvolvidos a partir de um alto nível de abstração que permitem ao pesquisador tomar decisões sobre o escopo de sua pesquisa, as regras para explicar os fatos e a validade de suas generalizações. Os seguintes métodos podem ser incluídos neste grupo: dedutivo, indutivo, hipotético-dedutivo, dialético e fenomenológico. Cada um deles está ligado a uma das correntes filosóficas que visa explicar como a mente processa a realidade. O

método dedutivo está associado ao racionalismo, o indutivo ao empirismo, o hipotético-dedutivo ao neopositivismo, o dialético ao materialismo dialético e o fenomenológico, naturalmente, à fenomenologia (GIL, 2022).

Enquanto o método indutivo, o dedutivo e o hipotético-dedutivo são os métodos científicos mais utilizados nas ciências tradicionais, o *design science* introduz um quarto método científico: o abduutivo. O método abduutivo consiste em investigar fatos e propor uma teoria para explicá-los. Logo, a abdução é o processo de geração de hipóteses explicativas para um determinado fenômeno/situação. O fato do *design science* empregar a abdução no curso de sua pesquisa não implica que os métodos científicos tradicionais não sejam empregados. No entanto, quando se trata do *design science*, eles têm certas limitações. Como resultado, os estudos conduzidos são frequentemente guiados por mais de um método científico, dependendo do estágio de desenvolvimento e do objetivo a ser alcançado. Em outras palavras, se o estágio que está sendo desenvolvido exige do pesquisador atividades e um raciocínio criativo, o método abduutivo é adequado (DRESCH *et al* 2020). Este trabalho se caracteriza como abduutivo, visto que este método busca estudar fatos e propor uma teoria para explicá-los.

Em relação à quarta etapa, que aborda o método de pesquisa, os autores Dresch *et al*, (2020) afirmam que o pesquisador deve segmentar e detalhar o método de pesquisa escolhido, com base no método científico definido. Além disso, ele deve definir as técnicas de coleta e análise de dados que serão utilizadas antes de construir seu método de trabalho. Esta definição irá apoiá-la, bem como a especificação dos procedimentos de triangulação. Para Da Silva e Menezes (2005), as maneiras clássicas de classificação de pesquisa, de acordo com os pontos de vista são: Do ponto de vista da natureza, abordagens, objetivos e procedimentos técnicos. Do ponto de vista da sua natureza, este trabalho caracteriza-se em uma pesquisa aplicada, pois visa gerar conhecimento de aplicação prática à solução de um problema específico. Trata-se também de uma pesquisa qualitativa com relação à abordagem, tendo em vista que a estruturação do processo considera aspectos da realidade que não podem ser quantificados e que podem variar de acordo com a estratégia do negócio. Do ponto de vista dos objetivos, é uma pesquisa exploratória, pois apresenta o problema ao leitor, a fim de torná-lo explícito e podendo auxiliar na montagem de hipóteses. A pesquisa exploratória abrange também um estudo da bibliografia e entrevistas com pessoas que já

participaram de experiências práticas com a situação explanada e que auxiliam no entendimento do problema.

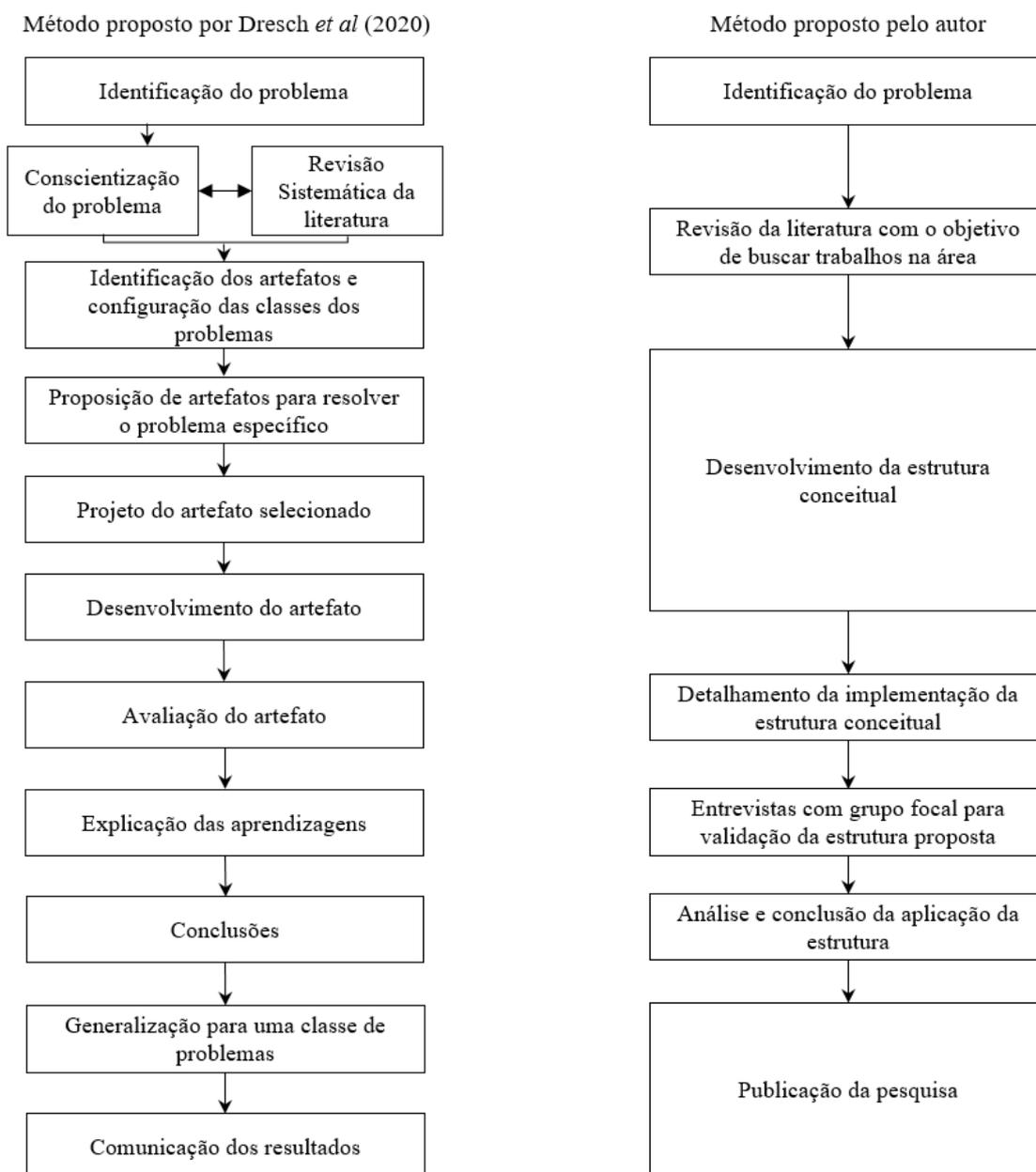
Em relação aos procedimentos técnicos, o *Design Science Research* (DSR) foi o método escolhido. O DSR é o método que sustenta e operacionaliza a condução da pesquisa quando o objetivo é produzir um artefato ou uma prescrição. A pesquisa em DSR, como método de pesquisa de resolução de problemas, busca construir e avaliar artefatos que permitam que as pessoas mudem as circunstâncias para situações desejáveis, por fim, ela é utilizada em pesquisas para reduzir a lacuna entre teoria e prática (DRESCH *et al* 2020).

A quinta e sexta etapas que se referem ao método de trabalho e as técnicas de coleta e análise de dados, serão descritas nas demais seções. A sétima etapa, referente aos resultados confiáveis, é apresentada no capítulo 5.

2.1 MÉTODO DO TRABALHO

O método de trabalho busca o detalhamento em etapas de uma pesquisa e tem como objetivo propiciar orientações básicas para a elaboração da investigação científica. Visam atuar como suporte à criatividade, bem como, colaborar para o alcance dos resultados estipulados (PEREIRA, 2019). Para a realização deste trabalho, utilizou-se como base as etapas estabelecidas por Dresch *et al*, (2020) na condução da DSR. A figura 3, apresenta a proposta dos autores e a adaptação realizada para a condução deste trabalho.

Figura 3: Estrutura para condução da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

A primeira etapa, que se refere à identificação do problema, surge da necessidade do pesquisador em estudar uma nova, ou interessante informação, encontrar resposta para uma questão importante, ou a solução para um problema prático ou classe de problemas (DRESCH *et al*, 2020). O problema a ser estudado, surge da percepção da falta de um método estruturado onde as empresas possam avaliar as oportunidades de melhoria buscando a eliminação das perdas conectando as tecnologias da I4.0 para potencializar essa busca. O surgimento de novas tecnologias em um mundo cada vez mais globalizado realça essa necessidade. Além disso, é perceptível a falta de uma

proposta de implementação que consiga guiar essas empresas por onde começar e analisar seus investimentos. Independente do potencial e tamanho das empresas, o investimento precisa ser eficaz para que a tecnologia realmente seja um meio de atingir o diferencial competitivo. A etapa 2, se refere à identificação dos assuntos de I4.0 e Lean, com isso, essa etapa ajuda a construir a definição do problema. A partir desta etapa foi possível perceber a relação entre o Lean e a I4.0 e como pode ser benéfico as suas aplicações em conjunto. Com a percepção desta relação entre os assuntos, pode-se citar as etapas 3 e 4. Nestas etapas, se aprofundou os benefícios do Lean e da I4.0 e se observou os seus benefícios. A maioria dos trabalhos apresentam os benefícios a nível de ferramentas do Lean e não em relação às perdas. Esse conhecimento, suportou as conclusões necessárias para a construção da estrutura conceitual e englobou as etapas de proposição, projeto e desenvolvimento do artefato. Por meio das etapas anteriores somadas a etapas criativas, se iniciou a proposição de soluções robustas que pudessem ser utilizadas para a melhoria da situação atual. Após isso, o projeto da estrutura conceitual precisou considerar soluções satisfatórias para o problema de estudo. Com a conclusão do projeto, o próximo passo foi o desenvolvimento da estrutura conceitual, que irá gerar conhecimento aplicável e útil para a solução do problema, melhoria do sistema existente e criação de novas estruturas.

A etapa 5 representa a validação da estrutura conceitual, sendo para Dresch *et al*, (2020) o momento que o investigador vai observar o comportamento do artefato na solução do problema. Nesta etapa, se buscou evidenciar os pontos de sucesso e fracasso gerando conhecimento teórico e prático. A avaliação do artefato ocorreu por meio de grupo focal com profissionais da indústria metal mecânica de diferentes segmentos, maiores detalhes serão descritos nos demais capítulos.

Na etapa 6 do método se formalizou a conclusão da pesquisa, mostrando quais foram as limitações que podem inclusive, orientar novos trabalhos. As conclusões e sugestões de trabalhos futuros também estão presentes neste capítulo. Por fim, a etapa 7 é a última etapa, onde ao longo do desenvolvimento da estrutura se buscou manter uma construção que possa ser aplicada em outras situações. Já a comunicação, por meio de publicações em *journals*, revistas, seminários, etc... permite que os interessados tenham acesso ao conteúdo (DRESCH *et al*, 2020).

2.2 GRUPO FOCAL

O grupo focal tenta entender os pensamentos que um grupo de pessoas teve como resultado de uma experiência, ideia ou evento. É uma entrevista robusta que é realizada em grupos com sessões estruturadas onde os participantes consideram a proposta, seu tamanho, seus componentes e o procedimento para condução do grupo (DRESCH *et al*, 2020). Neste mesmo sentido Duarte e Barros, (2011) afirmam que o grupo focal, como ferramenta de pesquisa qualitativa, ajuda a identificar tendências, o foco e desvendar problemas.

Os benefícios do grupo focal incluem a sinergia criada pela participação coletiva dos entrevistados, a interação entre os participantes, que enriquece suas respostas, a flexibilidade do moderador em controlar o fluxo da entrevista, a profundidade e o calibre das verbalizações e expressões (DUARTE E BARROS, 2011). Essas entrevistas são frequentemente utilizadas em estudos exploratórios, a fim de proporcionar uma melhor compreensão do tema, gerar hipóteses e fornecer subsídios para a construção de instrumentos de coleta de dados. Mas também podem ser usados para aprofundar um assunto, como é o caso de pesquisas qualitativas (GIL, 2019).

Tremblay *et al*, (2010) propõem dois tipos de grupos focais que podem ser utilizados para a avaliação dos artefatos desenvolvidos pelo DSR. O primeiro é o grupo focal exploratório com o objetivo de buscar melhorias incrementais rápidas na criação de artefatos, o segundo é o grupo focal confirmatório que tem como objetivo demonstrar na prática a utilidade dos artefatos desenvolvidos. Para avaliação de artefatos, o grupo focal é o mais indicado (DRESCH *et al*, 2020). Neste trabalho foi utilizado o grupo focal exploratório, visto que, o objetivo é desenvolver um artefato.

2.2.1 Planejamento do grupo focal

Primeiramente, dentro da etapa de planejamento é preciso definir o objetivo, sendo assim, o objetivo do grupo focal neste trabalho é validar a estrutura conceitual proposta, bem como, potenciais melhorias incrementais. Após a definição do objetivo, outra etapa importante é a definição do grupo e seus critérios de seleção. Para Kitzinger (1994), os critérios de seleção devem estar diretamente relacionados ao objetivo do estudo, ou seja, para a seleção e organização do grupo focal é imprescindível ter claro os critérios utilizados. Para maximizar o potencial de reflexões sobre experiências em comum, a maioria dos pesquisadores aconselha a homogeneidade nos grupos focais.

Pode ser vantajoso reunir um grupo diverso para maximizar a variedade de perspectivas dentro de um grupo, embora hierarquias profissionais, acadêmicas e outras possam interferir na expressão dos dados.

Para Gil (2019), o número de participantes varia de 6 a 12, já para Dall’Agnol (1999), pode variar entre 6 a 15 participantes. Seguindo as recomendações, o grupo focal foi realizado com 10 profissionais de diferentes áreas do setor automotivo e com conhecimento nos assuntos abordados pela estrutura conceitual, sendo eles, TOC, Lean, I4.0 e validação econômico-financeira, A definição dos participantes reforça a importância de contemplar a validação na utilização prática da estrutura conceitual e sua relevância na implementação do Lean Digital nas empresas. O Quadro 1 apresenta as características dos participantes, sendo eles o cargo/função e os conhecimentos que possuem considerando as áreas utilizadas na proposição da estrutura.

Quadro 1: Participantes do grupo focal

Participantes	Cargo/ função	Conhecimento			
		TOC	LEAN	INDÚSTRIA 4.0	VALIDAÇÃO ECONÔMICO-FINANCEIRA
1º Participante	Engenheiros de Processos		x	x	
2º Participante	Coordenador de Controladoria				x
3º Participante	Coordenador de Logística	x	x	x	
4º Participante	Engenheiro de Projetos		x	x	
5º Participante	Coordenador de Engenharia de Processos	x	x	x	x
6º Participante	Engenheiro de Manufatura Digital	x	x	x	x

7º Participante	Engenheiro de Simulação	x	x	x	
8º Participante	Engenheiro de Processos		x	x	
9º Participante	Engenheiro de Processos		x	x	
10º Participante	Especialista de Excelência Operacional	x	x		x

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

No grupo focal, outra definição importante é o papel do moderador, ele deve ser capaz de conduzir a reunião e atuar como facilitador da conversa (DUARTE E BARROS 2011). No desenvolvimento deste trabalho, o grupo focal foi conduzido pelo pesquisador que atuou como moderador, a postura adotada teve como objetivo não induzir as respostas dos participantes e conseguir fazer com que um maior número possível dos participantes participasse ativamente da conversa com os outros membros do grupo focal. Por fim, a organização das datas e horários buscou atender da melhor forma as agendas para que fosse possível contar com todos no momento das interações.

2.2.2 Condução do grupo focal

O grupo focal foi conduzido de forma online, por meio da plataforma *Microsoft Teams*. A duração deste grupo focal foi de três horas, realizados em dois encontros que seguiram as etapas de pesquisa por meio de uma apresentação em *Power Point*. O material foi enviado antecipadamente aos participantes por *e-mail*, para que conseguissem analisar os conceitos e informações que foram apresentadas. Além disso, foi realizada uma conversa prévia de alinhamento, reforçando a importância da participação de cada um nos dois encontros.

No início do grupo focal, os participantes foram informados que seria realizada a gravação do encontro, de tal forma que todos consentiram em prosseguir desta forma. Se aconselha que as perguntas sigam um ritmo que comece com perguntas amplas, divergentes e não estruturadas, avance para perguntas focais, convergentes e estruturadas e conclua com perguntas amplas e não estruturadas (DUARTE E BARROS, 2011). Neste sentido, o roteiro deste trabalho se inicia com a apresentação geral, contextualização dos temas abordados na estrutura conceitual, relação entre os

conceitos e apresentação final da estrutura conceitual, o quadro 2 detalha as principais etapas. Por fim, após a realização do encontro com o grupo focal, as considerações feitas foram transcritas.

Quadro 2: Etapas conduzidas com o grupo focal

ETAPA	OBJETIVO
Apresentação geral	<ul style="list-style-type: none"> ✓Expectativa sobre o grupo focal e comportamentos esperados ✓Explicação do objetivo e das etapas ✓Apresentação da pauta e assuntos
Contextualização	<ul style="list-style-type: none"> ✓Evolução da indústria ✓Evolução do Lean ✓Lean + Indústria 4.0 – Lean Digital
Relação entre conceitos	<ul style="list-style-type: none"> ✓Potenciais benefícios com o Lean Digital
Análise e Discussão	<ul style="list-style-type: none"> ✓Escuta e Feedback sobre a aplicação do Lean Digital
Relação entre conceitos	<ul style="list-style-type: none"> ✓Perdas do Lean ✓Modelos da Indústria 4.0 ✓Divisão das tecnologias de base e front
Análise e Discussão	<ul style="list-style-type: none"> ✓Escuta e feedback sobre a classificação em tecnologias de base e front
Relação entre conceitos	<ul style="list-style-type: none"> ✓8 Perdas x Tecnologias
Análise e Discussão	<ul style="list-style-type: none"> ✓Escuta e feedback sobre o impacto das tecnologias em cada perda do Lean
Relação entre conceitos	<ul style="list-style-type: none"> ✓Conceito da TOC
Análise e Discussão	<ul style="list-style-type: none"> ✓Escuta e feedback sobre a utilização da TOC na estrutura conceitual
Relação entre conceitos	<ul style="list-style-type: none"> ✓Validação Econômico-financeira
Análise e Discussão	<ul style="list-style-type: none"> ✓Escuta e feedback sobre a utilização da Validação econômico-financeira na estrutura conceitual
Estrutura conceitual completa	<ul style="list-style-type: none"> ✓Apresentação da estrutura conceitual completa
Análise e Discussão	<ul style="list-style-type: none"> ✓Escuta e feedback sobre a estrutura proposta e contribuição para o Lean Digital ✓Escuta e feedback sobre a relevância de sua utilização ✓Escuta e feedback sobre replicação da estrutura em outras empresas/segmentos.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

2.2.3 Análise dos dados

A análise de dados procura dar sentido a um conjunto de informações levantadas. Uma das técnicas utilizadas com esse fim é a análise de conteúdo (DRESCH *et al* 2020). A maneira mais confiável de reproduzir com precisão as respostas é fazer anotações durante a entrevista ou usar um gravador para capturá-las. A anotação feita após a realização da entrevista apresenta dois inconvenientes: as limitações da memória humana, que impedem de lembrar todas as informações e a distorção provocada pelos elementos subjetivos que são projetados durante a transcrição da entrevista.

A análise começou com a leitura detalhada de cada anotação realizada no momento das interações com o grupo focal, junto a isso, a escuta repetida das gravações foram necessárias para garantir a maior riqueza de detalhes e relembrar o contexto das anotações. Em seguida, as escutas das gravações foram transcritas manualmente buscando manter a fidelidade das informações do grupo focal e gerar as primeiras impressões e pensamentos pelo pesquisador. Por fim, o conteúdo foi analisado de forma crítica gerando a definição de quais dados serão incrementados a estrutura conceitual, com isso, o objetivo é inserir, revisar ou modificar a estrutura conceitual desenvolvida.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

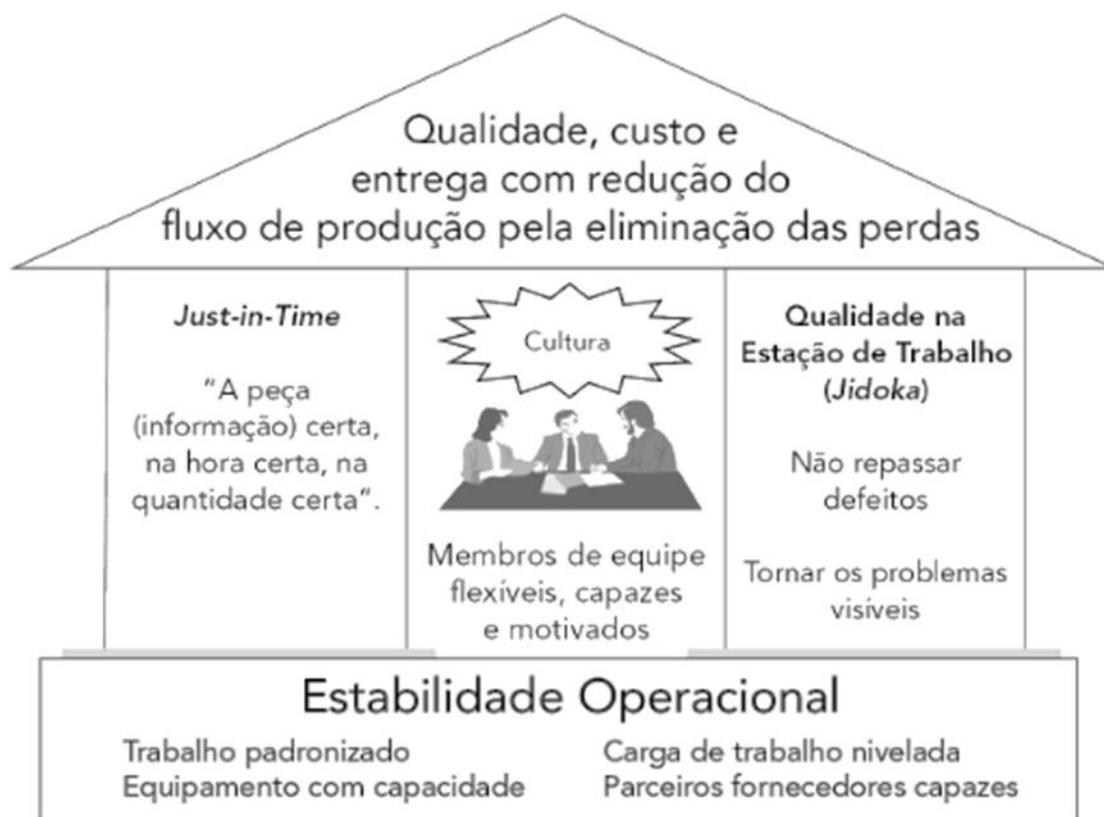
Esta seção aborda os conceitos dos assuntos relacionados ao trabalho, e com isso, se busca o nivelamento do conhecimento. Serão abordados os assuntos referentes à TOC, Lean, I4.0 e validação econômico-financeira, bem como, suas disciplinas.

3.1 SISTEMA TOYOTA DE PRODUÇÃO E O LEAN

A Toyota nunca usou os termos "Lean" e "enxuto" para descrever seu sistema de produção. Foi simplesmente a maneira como um pequeno fabricante aprendeu a criar carros e automóveis na década de 1940 e a lidar com os problemas reais que tiveram em seus primeiros anos. A empresa não tinha recursos, havia falta de espaço na fábrica e os fornecedores de autopeças tiveram que correr riscos e investir em fábricas e equipamentos ao lado da Toyota (LIKER, 2022).

Ohno não queria que o STP fosse retratado como uma figura porque acreditava que o STP era vivo, em vez de ser um objeto. Ele declarou: "Se o colocarmos no papel, vamos matá-lo". Ainda assim, havia a necessidade de uma fórmula que pudesse disseminar, comunicar e treinar rapidamente fornecedores e operadores sobre os aspectos mais críticos das melhores práticas da Toyota quando a empresa começou a espalhar seu sistema de produção incipiente para fora da cidade e do Japão. O jovem Fujio Cho foi quem inicialmente criou um modelo de casa para transmitir essas verdades naquela época (LIKER, 2022). O modelo da casa Toyota continua sendo a representação mais precisa dos princípios orientadores e da filosofia do STP, uma casa é uma ótima analogia para as lições que a Toyota aprendeu ao longo de décadas produzindo têxteis e depois veículos motorizados após inúmeras falhas e testes, um bom exemplo de sequência durante a construção, bem como, durabilidade e componentes físicos de sua estrutura, uma casa estável é forte e durável (HOEFT, 2013).

Figura 4: Casa do Sistema Toyota de Produção



Fonte: Adaptado de Liker (2022).

A base do STP é a absoluta eliminação das perdas, os dois pilares necessários à sustentação do sistema são o *Just-in-time* e a automação. *Just-in-time* significa que, em um processo de fluxo, as peças corretas necessárias para a montagem chegam à linha apenas na quantidade necessária no momento exato em que são solicitadas. Um negócio que estabeleça inteiramente esse fluxo, tem potencial para chegar a estoque zero. Do ponto de vista da gestão da produção, este é um estado ótimo, no entanto, um produto feito com milhares de componentes, como um automóvel, envolve um grande número de processos. A aplicação do *Just-in-time* no planejamento de produção para todos os processos é obviamente bastante desafiadora (OHNO, 1999).

A outra base do STP é denominada de automação, que não deve ser confundido com a simples automação, é conhecida também como automação com um toque humano. Muitas máquinas funcionam de forma independente depois de conectadas, mas as máquinas de hoje têm a capacidade de continuar produzindo mesmo com pequenas anormalidades, como a perda de algum fragmento em seu interior. Por exemplo, a quebra de matrizes, quando isso ocorre, dezenas e centenas de componentes defeituosos são produzidos e se acumulam rapidamente. Essa máquina automatizada

torna impossível impedir a produção em massa de produtos com defeitos, não há nenhum sistema de conferência automatizado que possa lidar com esses contratemplos, é por isso que a Toyota dá ênfase à automação, máquinas que podem evitar tais problemas “autonomamente” e não à simples automação. A ideia surgiu com a invenção de uma máquina de tecer auto ativada por Toyoda Sakichi, fundador da Toyota Motor Company (OHNO, 1999).

Shingo (2007), afirma que o STP é para cerca de 80% das pessoas "um sistema Kanban". Outros 15% podem realmente saber como funciona nas fábricas e dizer: "É um sistema de produção", apenas uma pequena minoria entenderá o objetivo do sistema e dirá: "É um sistema que busca eliminar as perdas". O STP é 80% eliminação das perdas, 15% um sistema de produção e apenas 5% o Kanban. Neste mesmo sentido, Monden (2015), afirma que o objetivo do STP é aumentar os lucros por meio das reduções de custos mediante a eliminação completa das perdas. Para alcançar as reduções de custos, a produção precisa se adaptar de forma ágil e flexível às mudanças na demanda do mercado evitando ociosidade na fábrica.

Cada princípio ou ferramenta realça a perda, o objetivo principal de toda ferramenta STP é fazer com que a perda apareça, seja qual for a ferramenta, podendo ser a gestão visual, 5S, trabalho padronizado, diagramas de espaguete ou troca rápida de ferramentas, ela ajuda na prevenção de perdas. A ferramenta por si só não elimina a perda, mas uma pessoa sensata que está usando uma delas pode se sentir inspirada a apresentar uma sugestão para diminuir essa perda. A utilização de uma ferramenta, desencadeia a busca incansável de um trabalhador por estratégias de localização e redução da perda (HOEFT, 2013).

3.1.1 Perdas

Mesmo antes da Segunda Guerra Mundial, a Toyota estava ciente de que o mercado japonês era muito menor e que não havia demanda suficiente para suportar os altos níveis de produção nos Estados Unidos. A Ford era cerca de 10 vezes mais produtiva que a Toyota, com uma linha de montagem de automóveis da Ford capaz de produzir 9.000 unidades por mês em comparação com as 900 unidades da Toyota. Os executivos da Toyota sabiam que, para sobreviver a longo prazo, precisariam modificar sua estratégia de produção em massa para se adequar ao mercado japonês. O sistema de produção em massa da Ford foi projetado desde o início para produzir um grande volume de poucos produtos. Esta é a razão pela qual todos os Modelos T foram pintados

inicialmente de preto. Por outro lado, a Toyota precisava produzir pequenas quantidades de vários produtos usando a mesma linha de montagem, pois a demanda do consumidor em seu mercado automotivo era muito baixa para suportar linhas de montagem de apenas um tipo de veículo (LIKER, 2022).

Kiichiro ficou extremamente desapontado com tudo o que viu na fábrica de teares da *Platt Brothers*. Apesar de impressionado com a qualidade do produto final, isso tinha um custo alto e exigia muita mão de obra para arrumar as peças e encaixá-las. No STP, o fluxo unitário é o ideal a ser buscado: alta agregação de valor desde o início até a entrega ao cliente, fluxo ininterrupto e sem trabalho adicional. A Toyota identificou sete tipos principais de perda que não agregam valor aos processos de produção, (LIKER, 2022). Com algumas modificações, esses conceitos podem ser usados para desenvolvimento de produtos, desenvolvimento de software, operações hospitalares e qualquer outro processo além das linhas de produção (LIKER, 2022, VACARI, 2019). As sete principais perdas são:

1. Super Produção. Produção realizada antes do necessário ou em quantidade maior que o necessário, ocasionando custo excessivo de mão de obra e custos desnecessários de transporte e armazenamento;
2. Espera. Pode estar relacionado a paradas e esperas de máquinas, insumos, pessoas ou folgas entre processos;
3. Transporte. Movimentação do estoque em processo (WIP) por grandes distâncias.
4. Excesso de Processamento. Etapas desnecessárias para processamento das peças, pode estar relacionado também a processamento ineficaz causado por uma ferramenta ou produto que foi mal planejado, levando a movimentos desnecessários e falhas. Por fim, critérios de qualidade superior ao requerido pelo cliente também são classificados nesta perda;
5. Excesso de estoque. Quantidades excessivas de matérias-primas, estoque em processo ou produtos acabados resultando em prazos de entrega mais longos, obsolescência, produtos danificados, custos elevados de armazenamento e transporte, além de atrasos.
6. Movimento desnecessário. Qualquer movimento que as pessoas façam durante o trabalho, como procurar, caminhar, pegar ou carregar objetos, ações que acabam não agregando valor ao produto.

7. Defeitos. Produção de defeitos e/ou retrabalhos. Consertar, descartar, produzir novo produtos significam perda de manuseio, tempo e esforço.

Além das 7 perdas tradicionais considerados no STP, existe a 8^o perda adicionado por Liker (2007) que trata sobre a perda da criatividade dos funcionários. Essa perda está relacionada à perda de tempo, ideias, habilidades, melhorias e oportunidades de aprendizagem por não envolver ou ouvir seus funcionários. Neste trabalho, será considerado a 8^a perda com o objetivo de entender quais tecnologias da I4.0 podem impactar positivamente na busca da redução ou eliminação desta perda proporcionando melhores condições de trabalho aos funcionários. Contribuindo para a inclusão da 8^a perda no trabalho, os autores ROSSI *et al*, (2022) comentam que no cenário atual, funcionários sem a perda de talento integrada em seu trabalho com as tecnologias da I4.0 foram uma das identificações para o primeiro passo rumo a implementação do Lean 4.0. Como no passado, sem pensar nas pessoas não há Lean, e sem Lean, não há controle de perdas, sejam eles digitais ou não.

Ao pensar sobre a eliminação total da perda, é necessário analisar alguns pontos importantes. Primeiramente o aumento da eficiência só faz sentido quando está associado à redução de custos, para obter isso, precisa-se produzir apenas o necessário usando um mínimo de mão-de-obra. Após isso, observar a eficiência de cada operador e de cada linha, então analisar os operadores como um grupo e depois a eficiência de toda a fábrica (todas as linhas). A eficiência deve ser melhorada em cada estágio e, ao mesmo tempo, para a fábrica, como um todo. O STP revela claramente o excesso de trabalhadores (LIKER, 2022).

3.1.2 Logística Interna Lean

A logística interna das empresas tem atraído muita atenção, pois as organizações buscam garantir a eficiência do seu fluxo interno. Para garantir que a demanda do cliente seja atendida, ela envolve fluxos de materiais, informações e pessoas oferecendo uma variedade de fluxos primários e secundários. Ela também está relacionada com as rotas pelas quais os entes passam, bem como as rotinas de seus agentes de fluxo. Muitas empresas se concentram em melhorias pontuais no seu fluxo sem levar em conta os efeitos globais que podem ocorrer (SILVA, 2022; OEY e NOFRIMURTI, 2018).

A logística passa a ser enxuta quando o pensamento enxuto é utilizado para melhorar o aproveitamento dos recursos na movimentação, sejam eles, empilhadeiras, maior giro de estoques e redução do espaço físico necessário para armazenar

componentes ou produtos acabados, simplificar o fluxo de informações e ter maior estabilidade de informações. Além disso, pode proporcionar melhor aproveitamento da mão de obra direta e indireta relacionada aos processos logísticos (ALVES e SANTOS, 2013). Colaboram ainda neste sentido Oey e Nofrimurti (2018), afirmando que a logística enxuta usa os mesmos princípios da manufatura enxuta para gerenciar as operações logísticas. As estratégias, tecnologias e métodos de manufatura enxuta melhoram a produtividade, eficiência, qualidade e entrega, além de reduzir custos e reduzir a perda de produtos, garantindo a satisfação de funcionários e clientes. Por fim, Daneshjo *et al* (2018), alegam que a aplicação de uma logística inteligente pode aumentar o lucro de uma empresa com esforço menor.

As prioridades na logística enxuta são os clientes, a melhoria contínua e ideias inovadoras. O planejamento e projeto do sistema logístico enxuto pode ser dividido em dois componentes principais: fluxo de materiais e fluxo de informações. O Mapa do Fluxo de Valor (VSM) pode ser usado para analisar o fluxo de materiais e informações dentro de uma organização (WANG, 2015). De acordo com Ferro (2006), das sete perdas clássicas definidos por Taiichi Ohno, quatro deles (movimentação, espera, estoque e transporte) estão associados ao que comumente é chamado de logística, considerando a administração dos estoques, da movimentação de materiais e do processamento das informações.

3.1.3 Os 3 R's da logística interna

A padronização de todo o processo de abastecimento da linha de montagem, que se baseia na minimização do transporte de materiais até o ponto de uso, é um componente fundamental no estudo da logística enxuta. Para garantir que haja material suficiente para as linhas de montagem, é necessário especificar a rota e a duração do ciclo de fornecimento (MYERSON, 2012). Os três R's da logística interna: o ritmo, a rota e a rotina estão diretamente ligadas, resultando em impactos entre si e gerando potenciais riscos ao correto funcionamento dos fluxos (SILVA, 2022).

As rotas são conceituadas pelo caminho ou percurso por onde o material, informação, colaborador ou cliente se desloca. Neste conceito, existem dois tipos de rotas possíveis: a rota táxi, que é representada por itinerários e pontos de paradas indefinidos ou a rota ônibus, itinerários e pontos de paradas definidos, conhecidos, respeitados e praticados (GHINATO, 2018). Neste mesmo sentido, Smalley (2004) afirma que as rotas de movimentação podem ser de dois tipos. O primeiro deles tem um

intervalo de tempo definido e quantidade de material variável, com isso, existe uma rota definida para o fornecimento e a coleta de cartões *kanban* é realizada a cada período fixo de tempo. O segundo tipo de entrega é de quantidade fixa enviada em um período de tempo variável, neste caso, o fornecedor é alertado da necessidade e reabastece o ponto de uso com uma quantidade padrão. Ao analisar as rotas, deve-se buscar a otimização dos fluxos, ou seja, menores distâncias, cruzamentos, contra-fluxos e *lead time*. Além disso, melhorar o dimensionamento físico como por exemplo, o *layout* e corredores e por fim, implementar gestão “à vista” (me de miru), para que não haja dúvidas quando ocorrerem desvios (GHINATO, 2018).

O ritmo é o “pulso” da operação, ditado pela demanda do cliente, sendo assim, é o *takt time* que pode ser expresso pela equação “tempo total disponível no período / demanda no período”. Neste conceito, se busca a garantia da conexão entre processos (cliente - fornecedor), o fluxo vai de fornecedor para cliente de acordo com as necessidades de consumo do cliente, dessa forma, o processo do fornecedor e todos os recursos de suporte estarão focados em garantir um fluxo contínuo de fornecimento ao processo. Além disso, o ritmo, permite dimensionar recursos em seu melhor nível de eficiência e níveis adequados de estoque (GHINATO, 2018).

A rotina é a sequência de atividades e periodicidade para execução de determinado procedimento e tem como objetivo garantir o fluxo pelas rotas no ritmo definido ou necessário. Voltando nos conceitos das rotas, pode-se citar a rota de movimentação dos ônibus por itinerários, parando em pontos definidos, em horários conhecidos e padronizados, buscando deixar e pegar passageiros. Com isso, é possível alcançar rotinas de movimentação padronizadas, tempos de ciclo definidos e permite o dimensionamento e balanceamento adequado dos agentes de fluxo (denominados *mizumashi*) ou comumente chamados de alimentadores/movimentadores (GHINATO, 2018).

3.1.4 **Pensamento enxuto (*Lean Thinking*)**

Um dos maiores equívocos sobre o STP é associar a sua aplicação apenas à uma coleção de ferramentas ou técnicas. Na realidade, cada princípio ou ferramenta parece servir a um determinado objetivo, podendo realçar uma perda, o que leva um funcionário a tomar alguma ação em um esforço para diminuí-lo. O professor e consultor da Toyota, Shigeo Shingo, descreveu-o como um "sistema para a completa eliminação da perda" (HOEFT, 2013).

Em uma perspectiva tradicional a única maneira de os gerentes motivarem seus funcionários é exercer controle externo sobre eles, o uso de métricas, juntamente com sistemas de remuneração baseados nessas métricas, possibilita a gestão da força de trabalho, portanto, qualquer empresa que use as mesmas métricas e recompensas que a Toyota, obterá os mesmos resultados. Na verdade, a Toyota evita vincular o pagamento a métricas específicas porque teme que isso faça com que as pessoas se concentrem apenas no que está sendo medido e ignorem outros aspectos do trabalho, a empresa preocupa-se não apenas com o alcance dos resultados, mas também com o pensamento que embasa os planos do grupo para alcançar esses resultados. Neste mesmo sentido, teme que incentivos baseados em métricas possam promover um comportamento individualista em detrimento do trabalho em equipe (LIKER e CONVIS, 2013).

Se há um segredo para o sucesso da Toyota, é que ela está pronta para investir o tempo e o dinheiro necessários para desenvolver todos os aspectos da organização, bem como, acreditar e provar na prática que seus funcionários são seu recurso mais valioso. Nessa situação, o papel de um líder é estar aberto ao tipo de autodesenvolvimento necessário para cultivar as próprias qualidades de liderança, desenvolver subordinados para que possam avançar e melhorar, remover obstáculos e estabelecer metas e desafios para que as equipes em todos os níveis organizacionais possam trabalhar juntos para melhorar continuamente e atingir as metas de longo prazo da Toyota (LIKER e CONVIS, 2013).

Desde que a Toyota iniciou suas operações, seus líderes acreditam que investir em seu pessoal é o segredo do sucesso da empresa, desde a fundação da empresa, a cultura da Toyota se desenvolveu e se tornou parte integrante de sua vantagem competitiva. A cultura é o que impulsiona as operações, garante que os carros sejam entregues no prazo e dentro do orçamento, garante que os engenheiros que projetam carros tenham uma compreensão completa de seu mercado-alvo, que os executivos da empresa antecipem tendências de longo prazo e tenham estratégias claras, e que todos os funcionários (referidos como membros da equipe) estão trabalhando arduamente para cumprir o plano anual da empresa. O Modelo Toyota é acima de tudo uma cultura, pois o modo como as pessoas pensam e agem está enraizado na filosofia da empresa e seus princípios. Por fim, o Modelo Toyota se trata de respeito pelas pessoas e melhoria contínua, o que não mudou desde que a empresa foi fundada (LIKER e HOSEUS, 2009).

Os fundadores da cultura da Toyota viveram e ensinaram sua filosofia. Todos os gerentes da Toyota devem completar um rigoroso programa de treinamento sobre os princípios do Modelo Toyota, que inclui instrução em sala de aula e orientação no trabalho, então, esses gerentes se tornam os professores e mentores de todos os funcionários até o nível de líderes de equipe. A Toyota passa anos cultivando líderes que defendem sua filosofia e estabelece às suas novas fábricas três anos ou mais para promover uma cultura fundamentalmente de alta qualidade. Em contrapartida, outras empresas acreditam que iniciar uma nova fábrica é simples. Essas empresas não começam com os sólidos alicerces da cultura Toyota e com lideranças fortes, e assim sofrem com uma séria desvantagem. Sem esses alicerces, é possível afirmar que mais de três anos seriam necessários para estabelecer uma cultura básica de qualidade (LIKER e HOSEUS, 2009)

3.1.5 **Relação entre ferramentas e perdas**

Para Neves *et al.*, (2018) a otimização dos fluxos de informação e dos processos de fabricação são, em geral, fatores extremamente importantes na vida de qualquer negócio, por isso, é fundamental que as empresas se adaptem rapidamente a esse tipo de realidade e implementem políticas e procedimentos para padronizar seus processos de fabricação, permitindo uma rápida adaptação ao mercado. Neste sentido Zhang *et al.*, (2020) afirmam que é essencial que as empresas desenvolvam a sustentabilidade enxuta, dessa forma, tanto o aprendizado quanto a compreensão do conhecimento das ferramentas Lean se tornam necessários. A produção enxuta visa eliminar todas as atividades que não agregam valor aos produtos e serviços e para atingir esse objetivo, normalmente é usada uma coleção de ferramentas relacionadas à eliminação das perdas, empresas de diversos setores estão promovendo o uso de ferramentas Lean com o objetivo de solucionar problemas (SILVA E FERREIRA, 2021).

A gestão do conhecimento desempenha um papel fundamental na aplicação das ferramentas Lean, da mesma forma que um bom carpinteiro usa ferramentas para construir uma casa ou que os gerentes de projeto de uma organização usam ferramentas para construir um negócio forte. O objetivo principal de toda ferramenta STP é fazer com que a perda seja evidenciada, seja a gestão visual, o método 5S, trabalho padronizado, fluxogramas ou a troca rápida de ferramentas, todas essas ferramentas trabalham para evitar perdas. Como já citado, a ferramenta por si só não resolve o problema, mas uma pessoa sensata que está usando uma delas pode se sentir inspirada a

apresentar uma sugestão para diminuir essa perda (HOEFT, 2013). Neste mesmo sentido, Lot *et al*, (2018) afirmam que o Lean é mais do que apenas um kit de ferramentas, é uma mudança na estrutura organizacional. As ferramentas Lean são essenciais para alcançar os resultados desejados e seu objetivo é mudar fundamentalmente a forma como as pessoas pensam dentro de uma organização e transformar a forma como toda a organização se comporta diante das necessidades de melhoria.

A implementação de ferramentas enxutas em uma organização ajuda a atingir um objetivo comum e uma abordagem bem estabelecida. A perda é resultado de metodologia, ferramentas utilizadas e fatores humanos que influenciam a tomada de decisão, função e habilidades lógicas em um processo (Purushothaman *et al*, 2020). Contribuem os autores Ferreira *et al*, (2019) afirmando que o foco das organizações deve estar na melhoria contínua de forma a satisfazer os seus clientes com resultado de produtos de alta qualidade, ao mesmo tempo que maximiza os seus lucros através da redução de perdas no fluxo de produção. A mentalidade enxuta permite que as organizações identifiquem e eliminem ineficiências dentro de seus processos e o uso de ferramentas enxutas é considerado uma solução simples, eficiente e econômica para aumentar a produtividade e o lucro. No quadro 3, é possível entender como as ferramentas podem contribuir na identificação e eliminação das perdas, é possível perceber que o mapeamento do fluxo de valor é um meio para a identificação de todas as perdas.

Quadro 3: Aplicação das ferramentas do pensamento enxuto nas perdas

DESPERDÍCIOS	FERRAMENTAS
ESPERA	<ul style="list-style-type: none"> • Mapeamento do Fluxo de Valor (MFV) • Manutenção Produtiva Total (TPM) • Melhoria na relação, cliente x fornecedor • Trabalhar de acordo com o takt time/ produção sincronizada • Recebimento/fornecimento just in time
TRANSPORTE	<ul style="list-style-type: none"> • Mapeamento do Fluxo de Valor (MFV) • Tecnologia de grupo • Fluxo contínuo (one piece flow) / redução no tamanho de lote

	<ul style="list-style-type: none"> • Manutenção Produtiva Total (TPM)
MOVIMENTAÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> • Mapeamento do Fluxo de Valor (MFV) • 5S's • Fluxo contínuo (one piece flow) / redução no tamanho de lote
SUPER PROCESSAMENTO	<ul style="list-style-type: none"> • Mapeamento do Fluxo de Valor (MFV) • 5S's
ESTOQUE	<ul style="list-style-type: none"> • Mapeamento do Fluxo de Valor (MFV) • Fluxo contínuo (one piece flow) / redução no tamanho de lote
SUPERPRODUÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> • Mapeamento do Fluxo de Valor (MFV) • 5S's • Trabalhar de acordo com o takt time/ produção sincronizada
DEFEITOS	<ul style="list-style-type: none"> • Mapeamento do Fluxo de Valor (MFV) • Ferramentas de controle da qualidade • Zero defeitos • Ferramentas poka yoke

Fonte: Adaptado de Salgado *et al* ((2009)

Em seus resultados Lot *et al*, (2018) citam que as ferramentas Lean ajudaram a identificar problemas, desenvolver soluções e implementá-las de forma estruturada e sustentável, deixando claro que não se tratava apenas de mudanças, mas sim de melhorias. Já no estudo de Ukey *et al*, (2022) a implementação de ferramentas Lean na indústria do vestuário aumentou a produtividade em cerca de 8% e reduziu os tempos de ciclo, além disso, as ferramentas enxutas também auxiliaram no gerenciamento da fabricação de roupas e no aumento da qualidade. No trabalho desenvolvido por Ferreira *et al*, (2019) foi possível alcançar a redução de 44% do tempo de setup em um equipamento gargalo, possibilitando maior desempenho do equipamento e flexibilidade em atender as demandas. Por fim, no trabalho dos autores Rizkya *et al*, (2019) a implementação do 5S foi capaz de trazer benefícios para a redução da área total utilizada (redução de 11,2%) e minimizar a perda de movimentação em 18,75%.

3.2 MODELOS DA INDÚSTRIA 4.0

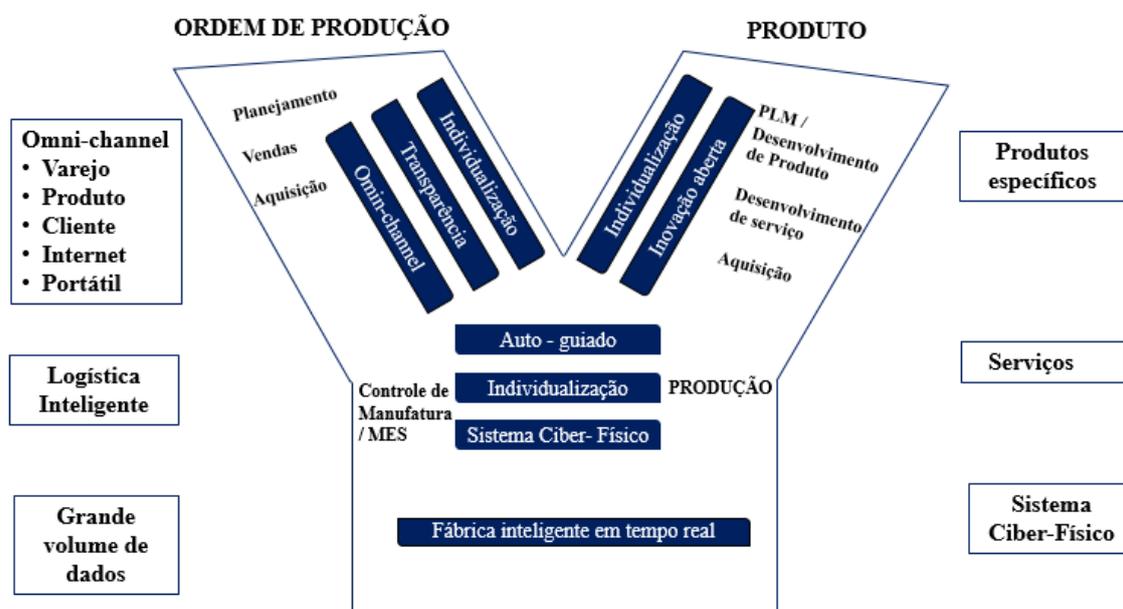
Vários modelos foram lançados para descrever a Indústria 4.0 e sua aplicação. A maioria deles tem uma visão de como a maturidade se desenvolverá, delineando como deve proceder a adoção da tecnologia. Inúmeros modelos podem ser encontrados, como o índice de maturidade *Acatech Industrie 4.0*, desenvolvido pela Academia Nacional Alemã de Ciências e Engenharia (SCHUH *et al*, 2020). Outros modelos descrevem o grau em que as organizações são capazes de tirar proveito das tecnologias da Indústria 4.0, ou seja, estarem preparadas para a utilização destas tecnologias (STENTOFT, 2019).

3.2.1 Modelo Scheer

O modelo Y ilustra os tipos de processos de produção significativos para a I4.0. O modelo é baseado no trabalho que o autor concluiu na década de 1980. Ideias semelhantes foram discutidas na época, mas nunca foram implementadas devido ao estado subdesenvolvido da tecnologia, porém, com a tecnologia de hoje, essas ideias podem ser expandidas e revisitadas. As seções superiores do modelo Y exibem atividades de planejamento, enquanto as seções inferiores exibem mecanismos de controle e execução de curto prazo (SCHEER, 2015).

Os processos de negócio orientados aos pedidos de uma empresa de manufatura são mostrados na ramificação do modelo Y do lado esquerdo. Os pedidos dos clientes servem de base para os pedidos de materiais e recursos necessários, bem como, pedidos para a produção. O planejamento e o gerenciamento dessas solicitações são chamados de logística. As relações com clientes e fornecedores são regidas pela logística externa, enquanto o processamento de pedidos internos é feito pela logística interna. Vale ainda ressaltar que toda a rede deve se tornar transparente a qualquer momento para todos os envolvidos. Os relacionamentos atuais de informações entre fornecedor e cliente já não são suficientes (SCHEER, 2015). A figura 5 demonstra o modelo desenvolvido pelo autor.

Figura 5: Modelo Y de Scheer para I4.0



Fonte: Adaptado de Scheer (2015)

O lado direito do modelo Y exhibe os processos necessários para produzir os produtos. A partir do uso de sistemas CAD/CAE, os processos de pesquisa e desenvolvimento criam as descrições geométricas do produto, bem como as regras de fabricação dos planos de trabalho. Os recursos necessários, como por exemplo, as máquinas, são determinadas com base no planejamento de fábrica. A logística e os processos relacionados ao produto estão intimamente ligados na fábrica e as diretrizes para fabricação atribuem itens a serem produzidos aos recursos de acordo com seu tipo, quantidade e qualidade. Os produtos acabados são então entregues ao departamento de expedição e entregues ao cliente (SCHEER, 2015).

Na indústria, as novas tecnologias I4.0 incluem os chamados sistemas ciber-físicos (CPS), que são sistemas de produção com uso intensivo de software e conectados à internet que podem conversar com materiais inteligentes e entre si. Se um material armazena suas informações, como qualidade e processos de produção em um sistema de armazenamento de dados (chip), esse material é classificado como inteligente. Por meio do uso de tecnologias de identificação por radiofrequência (RFID), esses materiais podem se movimentar praticamente de forma autônoma pelo processo de produção. Os sistemas e materiais utilizados pelo CPS coordenam as ofertas e demandas de capacidade por meio de uma plataforma virtual. Quando um CPS falha inesperadamente, outro sistema pode assumir a tarefa automaticamente e o sistema organiza independentemente o fluxo de materiais (SCHEER, 2015).

A produção em lotes unitários do processo de fabricação é viabilizada pelo alto grau de flexibilidade do CPS, pois a alternância entre os processos do sistema pode ser feita sem perder tempo ou dinheiro. Como resultado, a produção de lotes unitários pode ser atingível com custos semelhantes ao da produção em massa. Outra tecnologia significativa é a capacidade de armazenamento de dados em massa no processo de produção (*Big Data*), possibilitada pelas reduções nos custos de armazenamento destes dados. Sensores são capazes de medir as condições em tempo real de máquinas, materiais e periféricos, com isso, o processo de análise dos dados não deve apenas preocupar em demonstrar situações do passado, mas sim, utilizar essas informações para ações imediatas e indicações de ações futuras (SCHEER, 2015).

De forma prática, se a coleta de uma pequena amostra de energia de uma máquina for realizada, a análise em tempo real pode ser usada para avaliar se o sistema precisa de manutenção devido ao uso irregular de energia. A possibilidade de uma fábrica que pode se controlar em tempo real é viabilizada pela convergência de várias tecnologias. Como uma camada intermediária entre a fábrica e as partes superiores do modelo Y, os chamados Sistemas de Execução de Manufatura (MES), são responsáveis pela compressão e análise de dados, com isso, pode-se prever que as estruturas hierárquicas desaparecerão gradualmente e que todas as partes de uma atividade industrial se conectarão diretamente umas às outras. Em relação a isso, é possível afirmar que a complexidade do sistema aumenta significativamente, tornando prudente ter cautela quanto ao conceito de ter uma fábrica totalmente inteligente. A *Smart Manufacturing* deve, portanto, ser expressa como um objetivo, mas acompanhada de etapas de execução factíveis (SCHEER, 2015).

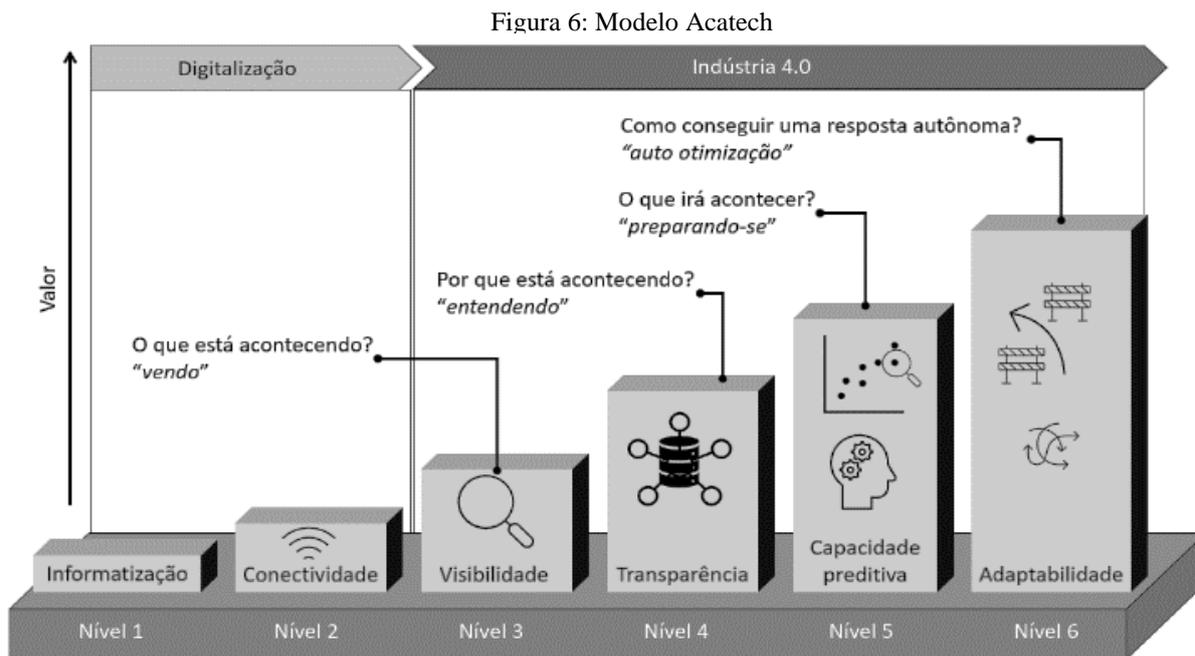
Ainda do lado superior direito do modelo Y é possível observar o desenvolvimento de produtos e serviços intimamente ligados, isso significa especificamente que o pedido de um cliente pode ser produzido com uma grande quantidade de variações, até chegar a customização total. Novas tecnologias, como a impressão 3D, por exemplo, possibilitam a produção imediata de uma peça de reposição que de outra forma não estaria disponível para entrega, dessa forma, a impressão 3D já aumentou a velocidade de desenvolvimento de novos produtos por meio do desenvolvimento mais rápido de protótipos (SCHEER, 2015).

3.2.2 Modelo Acatech

A abordagem do modelo é construída em uma progressão de níveis de maturidade ou níveis de desenvolvimento baseados em valor que ajudam as empresas a navegar em cada estágio da transição, desde os requisitos fundamentais da I4.0 até a implementação completa. Cabe a cada empresa determinar qual estágio de maturidade melhor equilibra os custos, capacidades e benefícios para suas próprias circunstâncias, levando em consideração como esses requisitos mudam ao longo do tempo em resposta às mudanças no ambiente de negócios e na estratégia da empresa. Isso ocorre, porque o estado-alvo desejado de uma empresa dependerá de sua estratégia de negócios. As seções apresentam uma série de ideais orientadoras que permitem que as empresas determinem quais recursos da I4.0 ainda precisam desenvolver. Além disso, as empresas têm acesso a uma ferramenta útil que pode ajudá-las a transformar toda a sua organização graças ao índice de Maturidade da Indústria 4.0 (SCHUH *et al*, 2020).

O estudo começa com os critérios fundamentais e apoia as empresas à medida que elas se transformam em organizações ágeis e de aprendizado. Existem seis estágios de desenvolvimento na jornada, cada estágio se baseia no anterior e descreve as habilidades necessárias para completá-lo e os benefícios que ele trará para a organização. É muito importante que a capacidade seja desenvolvida gradualmente, para que as vantagens do primeiro estágio possam ser obtidas com um nível de esforço inferior ao do segundo estágio. O processo de transformação é uma jornada contínua de muitas etapas sucessivas que são realizadas de forma incremental e podem não estar perfeitamente sincronizadas entre negócios, fábricas, linhas e células. Cada empresa deve determinar qual estágio de desenvolvimento equilibra custos e benefícios e deve ser escolhido como o estado final para o processo de transformação planejado (SCHUH *et al*, 2020).

As empresas ainda estão lutando para estabelecer as condições fundamentais para a I4.0, o caminho do desenvolvimento, portanto, começa com a digitalização. A I4.0 não inclui a digitalização em si, mas a informatização e a conectividade são necessárias para sua execução. Após essas duas primeiras etapas, há mais quatro etapas onde são estabelecidas as competências necessárias para a I4.0. Na figura 6 consta a ilustração dos seis estágios:



Fonte: Adaptado de Schuh *et al* (2020)

3.2.2.1 Informatização

Por servir de base para a digitalização, a informatização é o estágio inicial do caminho de desenvolvimento, neste ponto, a empresa utiliza muitas tecnologias de informação independentemente umas das outras. Na maioria das empresas, a informatização já é bastante avançada e utilizada principalmente para acelerar processos repetitivos. A informatização tem muitas vantagens, como viabilizar a produção de muitos itens com custos mais baixos, mantendo padrões de qualidade e níveis de precisão mais elevados. No entanto, muitos equipamentos ainda podem ser encontrados sem interface digital, isso acontece principalmente em equipamentos antigos ou operações manuais (SCHUH *et al*, 2020).

3.2.2.2 Conectividade

No estágio de conectividade, a implantação isolada da tecnologia é substituída por componentes conectados, aplicativos usados estão conectados uns aos outros e espelham os principais processos de negócios da empresa. Partes dos sistemas de tecnologia operacional (OT) fornecem conectividade e interoperabilidade, mas a integração total das camadas de TI e OT não ainda ocorreu. As principais operações de negócios da empresa são refletidas em aplicativos de negócios amplamente utilizados, todos interconectados. No chão de fábrica, é comum ver equipamentos com 50 anos ou mais ainda em operação, a nova tecnologia relacionada a sensores permite que esses

ativos, que continuam muito produtivos, sejam simplesmente conectados para fornecer dados de produção (SCHUH *et al*, 2020).

3.2.2.3 Visibilidade

Com a ajuda de sensores, processos inteiros podem ser registrados com muitos pontos de dados, com isso, os eventos podem ser registrados em tempo real em toda a empresa ao invés de, simplesmente em locais isolados, como por exemplo em células de fabricação. Como resultado da queda dos preços de sensores, microchips e tecnologia de rede, é possível a manutenção contínua de um modelo digital atualizado de fábricas. Este modelo pode ajudar a esclarecer o que está ocorrendo dentro da empresa a qualquer momento, para que as escolhas de gerenciamento possam ser apoiadas por dados, assim, serve como peça fundamental de construção para as etapas seguintes (SCHUH *et al*, 2020).

Para muitas empresas, criar um modelo digital é uma tarefa significativa, dentre alguns pontos de atenção estão os dados que são frequentemente armazenados em silos descentralizados. Mesmo em operações centralizadas, relativamente poucos dados ainda são coletados para atividades como produção, logística e serviços. Outro ponto importante a ser citado, é que os dados coletados são frequentemente acessíveis apenas por um pequeno grupo de pessoas que tem a verdadeira compreensão da relevância desses dados (SCHUH *et al*, 2020).

Um exemplo que pode ser citado é o uso de KPI's e painéis em tempo real que permitem identificar rapidamente a variação da data de entrega causada por um problema específico, possibilitando que o gerente de produção altere o planejamento de produção e informe aos clientes e fornecedores. Este é um conceito que as empresas ainda precisam amadurecer, eles devem ser capazes de construir constantemente um modelo preciso para toda a empresa, invés de estudos de dados individuais. A integração de sistemas de Gerenciamento do ciclo de vida do produto (PLM), Planejamento de recursos empresariais (ERP) e MES oferece uma visão completa que torna o *status quo* visível nas diversas camadas da empresa (SCHUH *et al*, 2020).

Construir visibilidade, no entanto, requer mudanças na cultura da organização e na estrutura organizacional, além das tecnológicas. As plataformas de colaboração ajudam a melhorar a comunicação entre as várias divisões da empresa, buscando com isso, permitir respostas rápidas às mudanças nas expectativas dos clientes. Isso implica em desconstruir as estruturas operacionais convencionais e integrar as pessoas mais

profundamente no processo de mudança. Por fim, exige uma cultura de comunicação não hierárquica onde novas ideias e modificações em procedimentos antigos possam ser debatidas abertamente e onde a ênfase esteja na melhoria contínua (SCHUH *et al*, 2020).

3.2.2.4 Transparência

O próximo passo é a empresa compreender o motivo de um evento e usar essa compreensão para gerar conhecimento por meio da análise de causa raiz. Os dados registrados devem ser analisados usando conhecimentos técnicos para encontrar e entender as interações. A transparência resulta da ligação e agregação de dados para produzir informação e também fornecer o conhecimento do processo necessário para facilitar a tomada de decisões complicadas e rápidas (SCHUH *et al*, 2020).

Normalmente, sistemas de negócios, como sistemas ERP ou MES, são instalados em paralelo com aplicativos de *Big Data*. Portanto, os aplicativos de *Big Data* oferecem uma plataforma padrão que pode ser usada, por exemplo, para fazer análises estocásticas abrangentes de dados para descobrir interações. Essa transparência em relação às interações relevantes pode, por exemplo, ser usada para realizar o monitoramento das condições de máquinas e equipamentos. Os parâmetros gravados são pesquisados por eventos que são então agregados para produzir eventos complexos que refletem a condição da máquina ou equipamento. Entre outras coisas, a transparência é, portanto, um requisito para a manutenção preditiva (SCHUH *et al*, 2020).

3.2.2.5 Capacidade Preditiva

A capacidade preditiva é o próximo nível após a transparência. Nesse ponto, a empresa pode simular diversas situações futuras e determinar quais são mais plausíveis. Uma operação mais confiável na empresa é possível pela redução da frequência de eventos imprevistos, como interrupções ou desvios de planejamento. Por exemplo, a capacidade preditiva, permite a detecção precoce de problemas recorrentes de logística, como falhas de transportadora, para que possam ser evitados, por exemplo, trocando de transportadora. A capacidade preditiva de uma empresa depende fortemente do trabalho de base que foi realizado anteriormente, isso ajudará a garantir que tanto as previsões quanto as recomendações baseadas neles são confiáveis (SCHUH *et al*, 2020).

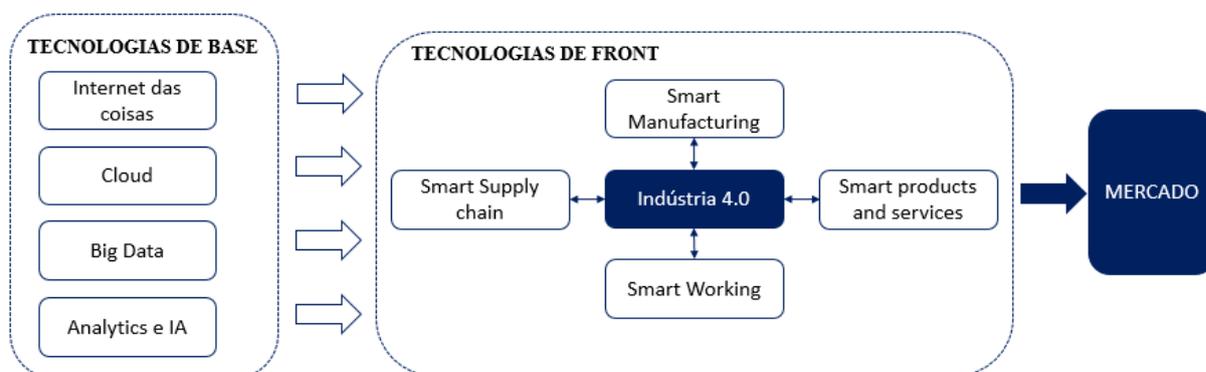
3.2.2.6 Adaptabilidade

A capacidade preditiva é um requisito fundamental para ações automatizadas e tomada de decisões. A adaptação contínua permite que uma empresa delegue certas decisões aos sistemas de TI para que possa se adaptar a um ambiente de negócios em mudança o mais rápido possível. O grau de adaptabilidade depende da complexidade das decisões e da relação custo-benefício. Quando uma empresa é capaz de usar as informações para tomar decisões que tenham os melhores resultados no menor tempo possível e executar automaticamente as ações necessárias, ou seja, sem intervenção humana, ela atingiu o objetivo de adaptabilidade. No entanto, é importante avaliar cuidadosamente os riscos de automatizar aprovações e reconhecimentos para clientes e fornecedores. A adaptabilidade também impõe uma série de exigências à própria empresa, ela exige colaboração dinâmica em toda a rede de valor para revisar continuamente as habilidades existentes e o desenvolvimento de competências essenciais, para que possam ser ajustadas conforme necessário (SCHUH *et al*, 2020).

3.2.3 Modelo 4 Smarts

O modelo proposto por Frank *et al*, (2019) é baseado em pesquisas. Os autores pesquisaram muitos trabalhos sobre a I4.0 na literatura antes de analisar e agrupar as tecnologias que as empresas estavam usando para colocar em prática os conceitos da I4.0. A figura 7 ilustra como as tecnologias da I4.0 podem ser divididas em dois níveis principais: o nível de tecnologia base e o nível de tecnologia *front-end*.

Figura 7: Modelo conceitual de Transformação Digital e as quatro inteligências da Indústria 4.0



Fonte: Adaptado de Frank *et al*. (2019).

As tecnologias de base impulsionam a transformação digital em todos os aspectos das empresas e diferenciam a I4.0 dos estágios anteriores de desenvolvimento industrial. As tecnologias de base incluem o uso de *Internet of things* (IoT), *Cloud Computing*, *Big Data*, *analytics* e inteligência artificial. Essas tecnologias permitem a transformação de uma empresa convencional com diferentes dimensões não integradas em uma empresa inteligente com diferentes dimensões conectadas de forma otimizada. Essas tecnologias são consideradas base porque estão presentes em todas as dimensões, eles aproveitam as dimensões da I4.0 e possibilitam a interconectividade, bem como proporcionam a inteligência dos novos sistemas de manufatura (FRANK *et al*, 2019).

As tecnologias de *front-end* (4 *Smarts*) incluem as tecnologias de uma empresa inteligente considerando seu ambiente interno e externo. O ambiente interno leva em consideração os fluxos de valor concentrados nas atividades industriais da empresa, incluindo seus processos produtivos (*Smart Manufacturing*) e as pessoas que executam as atividades (*Smart Working*). O ambiente externo se concentra nos fluxos de valor que conecta as operações internas com as operações externas, como por exemplo, sua cadeia de suprimentos (*Smart Supply Chain*) e seus clientes (*Smart Products* e *Smart Services*). Essas quatro dimensões inteligentes abrangem todo o potencial de aplicação da tecnologia da I4.0, pois considera os principais aspectos apresentados por outros autores em frameworks anteriores (FRANK *et al*, 2019).

3.2.3.1 *Smart Manufacturing e Smart Products*

As tecnologias para transformação de produtos são levadas em consideração pelo *Smart Manufacturing*, enquanto as tecnologias para oferta de produtos são levadas em consideração pelo *Smart Products*. Portanto, se considera que o *Smart Manufacturing* é o início e o objetivo principal da I4.0 enquanto o *Smart Products* é sua extensão. Em relação a dimensão *Smart Manufacturing*, os autores classificaram as tecnologias em seis objetivos principais, sendo eles, integração vertical, virtualização, automação, rastreabilidade, flexibilidade e gestão energética. Para mostrar a pesquisa realizada e o resumo destas tecnologias conforme as suas categorias, o quadro 4 foi desenvolvido:

Quadro 4: Tecnologias do *Smart Manufacturing*

CATERGORIAS	TECNOLOGIAS SMART MANUFACTURING	REFERÊNCIAS
Integração Vertical	Sensores, atuadores, Controles de lógica de programação (CLP) Supervisão, controle e aquisição de dados (SCADA) Sistema de Execução da Manufatura (MES) Planejamento de recursos empresariais (ERP) Comunicação máquina-para- máquina (M2M)	Jeschke et al. (2017); Lee et al. (2015) Jeschke et al. (2017) Telukdarie et al. (2018); Jeschke et al. (2017) Jeschke et al. (2017) Gilchrist (2016)
Virtualização	Comissionamento virtual Simulação de processos (manufatura digital) Inteligência artificial para manutenção preditiva Inteligência artificial para planejamento da produção	Mortensen and Madsen (2018); Tao et al. (2018c) Jeschke et al. (2017) Tao et al. (2018c) Gilchrist (2016)
Automação	Comunicação máquina-para- máquina (M2M) Robôs (Robôs industriais, veículos autônomos guiados, etc) Identificação automática de não conformidades na produção	Gilchrist (2016) Gilchrist (2016) Gilchrist (2016); Jeschke et al. (2017)
Rastreo	Identificação e rastreabilidade de matéria prima Identificação e rastreabilidade de produto final	Angeles (2009)
Flexibilidade	Manufatura aditiva Linhas autônomas e flexíveis	Weller et al. (2015); D'Aveni (2015) Balogun and Popplewell (1999); Wang et al. (2016a)
Gestão de energia	Sistema de monitoramento da eficiência energética Sistema de melhorias de eficiência energética	Gilchrist (2016); Kagermann et al. (2013) Jeschke et al. (2017); Kagermann et al. (2013)

Fonte: Adaptado de Frank *et al* (2019)

Por outro lado, as tecnologias de *front-end* para produtos inteligentes incluem componentes inteligentes que permitem recursos e serviços digitais juntamente com o fornecimento destes produtos. Sensores podem permitir que os clientes tenham acesso às informações de condições do produto e como utilizá-lo, além disso, os produtos podem ter funções de otimização buscando melhorar o seu desempenho. O monitoramento também permite aos fabricantes entender padrões de utilização e comportamento de seus clientes, com isso, novos produtos podem ser desenvolvidos, novos serviços podem ser incrementados ou em algumas situações, o próprio produto se tornar um serviço. A quadro 5 a seguir resume os pontos citados:

Quadro 5: Tecnologias do *Smart Products*

CATERGORIAS	TECNOLOGIAS SMART PRODUCTS	REFERÊNCIAS
Capacidades inteligentes conectadas à produtos	<ul style="list-style-type: none"> •Conectividade •Monitoramento •Controle •Otimização •Autonomia 	Porter and Heppelmann (2014)

Fonte: Adaptado de Frank *et al* (2019)

3.2.3.2 *Smart Supply Chain e Smart Working*

O *Smart Supply Chain* e o *Smart Working* são dois grupos de tecnologia de *front-end* complementares. Estes dois grupos foram separados do *Smart Manufacturing e Smart Products* pelos autores porque os dois primeiros visam agregar valor à fabricação e aos produtos finais, enquanto estes dois grupos visam fornecer eficiência às atividades operacionais complementares. Tanto o *Smart Supply Chain* quanto o *Smart Working* são consideradas *front-end*, pois impactam diretamente no desempenho operacional da empresa, os detalhes sobre as tecnologias específicas para essas duas dimensões são demonstrados no quadro 6:

Quadro 6: Tecnologias do *Smart Supply Chain e Smart Working*

TECNOLOGIAS PARA SMART SUPPLY CHAIN	REFERÊNCIAS
<ul style="list-style-type: none"> • Plataformas digitais com fornecedores • Plataformas digitais com clientes • Plataformas digitais com outras unidades de negócio 	(Pfohl <i>et al.</i> , 2017; Angeles, 2009; <i>et al.</i> , 2004)
TECNOLOGIAS PARA SMART WORKING	REFERÊNCIAS
<ul style="list-style-type: none"> • Monitoramento remoto de produção • Operação de produção remota • Realidade aumentada para manutenção • Realidade aumentada para treinamento de operadores • Realidade virtual e aumentada para desenvolvimento de produto • Robôs colaborativos 	(Wang <i>et al.</i> , 2016a; El Kadiri <i>et al.</i> , Zhong <i>et al.</i> , 2017) (Elia <i>et al.</i> , 2016; Scurati <i>et al.</i> , 2018) (Elia <i>et al.</i> , 2016; Gorecky <i>et al.</i> , 2017) (Elia <i>et al.</i> , 2016; Tao <i>et al.</i> , 2018b) (Du <i>et al.</i> , 2012; Wang <i>et al.</i> , 2015)

Fonte: Adaptado de Frank *et al* (2019)

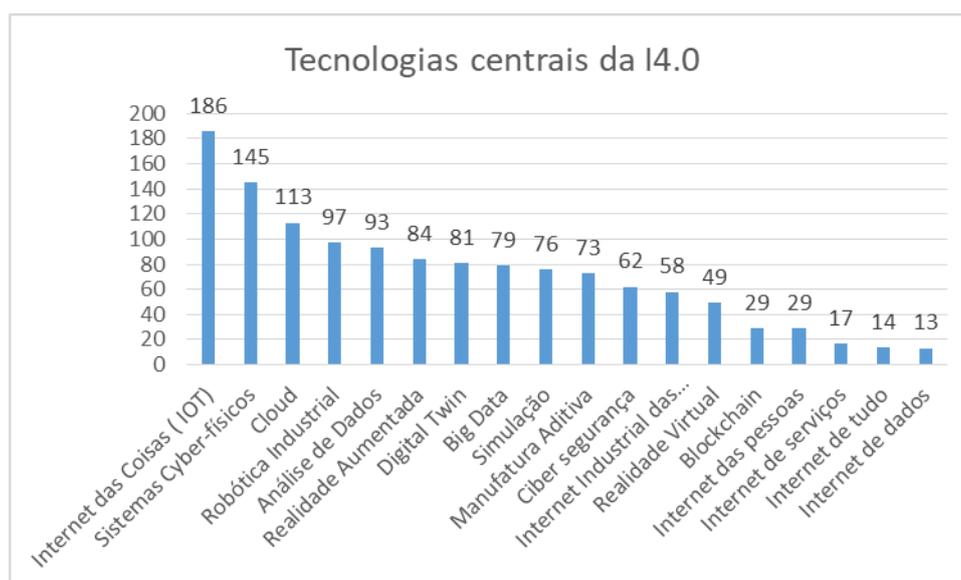
Os autores consideram que o *Smart Supply Chain* auxilia a empresa na busca da integração horizontal, ou seja, desde a entrega da matéria prima, bem como, a entrega do produto final ao cliente, conseguindo assim, a comunicação e monitoramento em tempo real dessas informações. As questões relacionadas a logística interna, são consideradas neste modelo, dentro do *Smart Manufacturing*. O *Smart Working* busca melhorar a condição de trabalho do operador, aumentar flexibilidade em operações complexas ou de exigência maior, tomada de decisão eficaz, além de, treinamentos em ambientes virtuais muito próximos da realidade (FRANK *et al*, 2019). Importante salientar que este será o modelo da I4.0 que terá maior utilização de seus elementos na estrutura conceitual desenvolvida, além das tecnologias contidas neste modelo, também

será utilizado o conceito de tecnologias de base e tecnologias de front para realizar a conexão com as perdas do lean.

3.3 TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 E SEUS BENEFÍCIOS

O objetivo desta seção é mostrar as características e benefícios da utilização de cada tecnologia da I4.0 que será utilizada na estrutura conceitual. Para a escolha das tecnologias, foram utilizados os modelos citados anteriormente no trabalho, com maior ênfase para o trabalho de Frank *et al* (2019). Os autores citam as tecnologias de base sendo elas a *Internet of Things (IoT)*, *Cloud*, *Big Data*, *analytics* e inteligência artificial. Como tecnologias de *front* o trabalho abordará as tecnologias que constam na dimensão relacionada ao *Smart Manufacturing* e *Smart Working*. Além disso, foram analisados outros trabalhos que citam as principais tecnologias para representar a I4.0. No trabalho de KANG *et al* (2016) são citadas a IoT, a *Cyber-Physical-Systems (CPS)* e a *Cloud*. Já para Pereira e Romero (2017), a I4.0 é um guarda-chuva que abrange tecnologias como CPS, IoT, *Big Data*, *Cloud*, Realidade Aumentada (AR) e robótica. Ainda neste sentido, no trabalho de Ghobakhloo *et al* (2021), os autores realizaram uma revisão sistemática da literatura, onde foram avaliados 745 artigos. A figura 8, lista as tecnologias centrais da I4.0 identificadas na análise dos conteúdos dos artigos elegíveis. As frequências listadas, não representam somente a ocorrência das palavras, mas sim, as citações nos artigos que reconhecem essas tecnologias como blocos de construção para a I4.0.

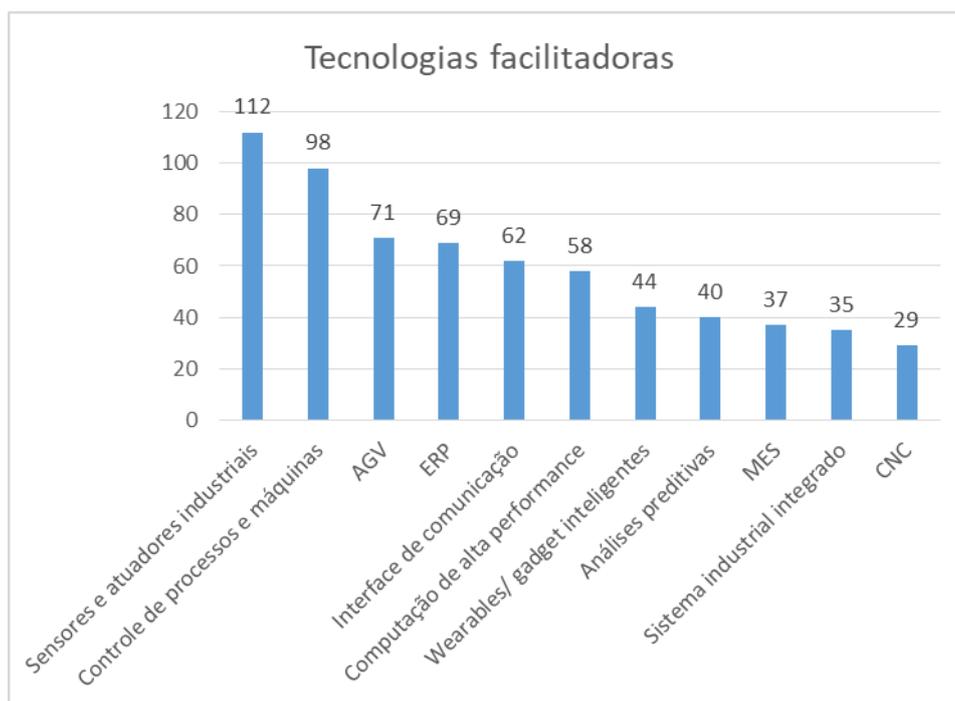
Figura 8: Tecnologias centrais da I4.0



Fonte: Adaptado de Ghobakhloo *et al* (2021)

O trabalho dos autores aborda também a classificação das tecnologias facilitadoras da I4.0. Essas tecnologias são consideradas como um nível de maturidade maior permitindo que as tecnologias centrais da I4.0 entreguem suas funcionalidades. Do ponto de vista da acessibilidade, essas tecnologias estão disponíveis comercialmente e são normalmente usadas em vários setores da indústria nas últimas décadas. Um ponto a ressaltar é que em muitos casos há a necessidade de realizar a customização no desenvolvimento de algumas destas tecnologias (GHOBAKHLOO *et al*, 2021).

Figura 9: Tecnologias facilitadoras da I4.0



Fonte: Adaptado de Ghobakhloo *et al* (2021)

3.3.1 Big Data e analytics

Em relação ao *Big Data* e *Data Analytics* as principais aplicações estão na melhoria da criação e manutenção do *Value Stream Mapping* (VSM), ou mapeamento do fluxo de valor, possibilitando o que alguns autores chamam de VSM dinâmico (PEREIRA *et al*, 2019). Em seu trabalho Rossi *et al*, (2022) mencionam o conceito de VSM 4.0 onde é possível com o uso do *Big Data* tratar e melhorar os dados recolhidos em tempo real da fábrica a fim de avaliar as mudanças e variáveis. O *Big Data* e o *Data Analytics* também são mencionadas em algumas publicações como ferramentas para a solução de problemas, bem como, para incentivar o desenvolvimento de trabalhadores

por meio de informações online que necessitam de uma postura ativa em um ambiente de fabricação inteligente (PEREIRA *et al*, 2019). Outra combinação pode acontecer com produtos inteligentes, onde os produtos podem armazenar informações sobre seus detalhes de produção, eliminando a necessidade de coletar dados para criar, por exemplo, um mapa de fluxo de valor (KOLBERG E ZÜHLKE, 2015).

No trabalho desenvolvido por Agostinho Jr e Baldo (2021), por meio de um estudo de caso, os autores analisaram os conhecimentos necessários para as pessoas que trabalham com o assunto de melhoria contínua. A experiência prática mostrou que, para garantir que os profissionais estejam prontos para assumir projetos de melhoria neste novo ambiente tecnológico, a I4.0 tornou essencial o conhecimento das tecnologias de informação e comunicação, bem como o *Big Data Analytics*. Esse novo tipo de profissional que deve combinar habilidades socioculturais, visão de negócios, conhecimento de análise de dados e tecnologias digitais, terá um papel crucial nas empresas de manufatura que desejam avançar para a I4.0. O operador analítico utiliza ferramentas como *Big Data* e IA para apoiar os processos de tomada de decisão (ROMERO *et al*, 2016).

3.3.2 IOT E IIOT

A *Internet of Things* (IoT) e a *Industrial Internet of Things* (IIoT) são citados como eficazes na melhoria da gestão da cadeia de suprimentos como um todo, entregando decisões autônomas que são otimizadas em termos de fluxo e facilitando o conceito do *Just in time* (PEREIRA *et al*, 2019). Além disso, ao analisar a estratégia ideal de alocação de produtos em tempo real, a IoT pode ter um impacto positivo nos esforços Lean para reduzir a perda de transporte e movimentação em armazéns. Ao fornecer informações rápidas e precisas sobre o status real do estoque do armazém, incluindo produtos vencidos, quantidade de estoque disponível, entre outros, um resultado eficaz pode ser alcançado. Dessa forma, os armazéns podem ter melhor controle de estoque e menos erros. (MAHDAVISHARIF *et al*, 2022).

Equipamentos conectados ao IIOT permitem que os profissionais criem e melhorem processos baseado em verdadeiros “pontos quentes” em seus ambientes de produção (DELOITTE, 2020). Um dos principais componentes para a implementação do Lean 4.0 é o mapeamento de processos e o monitoramento em tempo real, pois sem eles é difícil dizer se as operações estão agindo de maneira enxuta. Sendo assim, é

possível identificar e endereçar gargalos de produção de forma mais rápida, a fim de reduzir perdas de qualquer tipo e garantir a conformidade entre todas as partes, incluindo clientes e fornecedores (ROSSI *et al* 2022).

3.3.3 Inteligência Artificial

Perico e Mattioli (2020), afirmam que por meio da inteligência artificial (IA) é possível que as máquinas aprendam com falhas ou situações que não foram mapeadas e assim, podem melhorar seus planos de manutenção. Neste mesmo contexto, De Assis *et al* (2022), citam alguns benefícios de se utilizar a IA, como o tempo de inatividade reduzido, taxas de falhas reduzidas, despesas de treinamento reduzidas, aumento de produtividade, necessidade reduzida de suporte pós-venda e custos de atividade reduzidos. Legat e Vogel-Heuser (2017), desenvolveram um modelo para o planejamento de pedidos, com base em IA e apoiada por técnicas de programação linear e otimização, concluindo que o modelo foi eficaz na solução de problemas relativos aos procedimentos de planejamento. Teschemacher e Reinhart (2017), utilizaram um algoritmo em um piloto na linha de produção de carrocerias de veículos com o objetivo de resolver problemas logísticos de um sistema *milkrun*, problemas estes, relacionados ao planejamento de rotas em sistemas de manufatura onde é necessária alta flexibilidade. O algoritmo teve resultados satisfatórios reduzindo o número de veículos e aumentando a flexibilidade dos sistemas para responder a mudanças inesperadas.

O *machine learning* pode simular e otimizar as quantidades de cartões *kanban* melhorando o nível de estoque e frequência de entrega (DELOITTE, 2020). Neste mesmo sentido, a manutenção preditiva é possibilitada por algoritmos de *machine learning*, nos quais o equipamento é monitorado com base nas condições dos sensores (como vibração, força e temperatura). Isso permite aumentar os intervalos de manutenção e, ao mesmo tempo, diminuir os eventos de falha. Já o *advanced analytics* pode estabilizar o planejamento usando dados históricos de execuções anteriores de produção para criar horários otimizados com base na disponibilidade da máquina, qualidade do processo e requisitos de recursos.

3.3.4 RFID

Zelbst *et al*, (2014) mostraram por meio de pesquisas estruturadas com especialistas de mais de 100 empresas de manufatura dos EUA, que o uso da tecnologia *Radio Frequency Identification* (RFID) e o compartilhamento subsequente de

informações melhoram a aplicação do conceito do JIT, alcançando um melhor desempenho operacional. Ao remover a perda dos processos de logística, de fabricação e melhorar a qualidade do produto e a velocidade de entrega, o RFID integrado a um sistema ERP permite que os fabricantes se tornem mais eficientes.

A tecnologia de identificação automática, como o RFID, pode ser aplicada para rastrear o consumo de peças/materiais em tempo real, acionando a atividade de reabastecimento automaticamente (DELOITTE, 2020). No estudo de Benevides *et al*, (2015) por meio de um trabalho de *Kaizen* foi sugerido a implementação da tecnologia RFID para solucionar o problema de gerenciamento de estoque de produtos acabados. Devido à grande movimentação, falta de controle e localização incorreta destes produtos, na contabilização do inventário sempre existiam divergências. Com o controle de 100% dessa movimentação os resultados foram a eliminação do erro humano, informatização e automação do processo logístico, além de economia de tempo no momento de expedição do produto. Junto às vantagens apresentadas, a informatização do sistema permite que o gestor tenha o controle total de seu estoque atualizado em tempo real, evitando dessa forma uma eventual falha na entrega de produtos ao seu cliente final.

3.3.5 *Cloud Computing*

A *Cloud Computing* é mencionada por seu acesso em tempo real às informações e integração com outros sistemas computacionais. O principal benefício é o compartilhamento de informações que podem ser disponibilizadas com o uso dessa tecnologia (PEREIRA *et al*, 2019). A *Cloud Computing* é frequentemente usada para oferecer suporte à captura e processamento de dados. A virtualização da rede do servidor como um conjunto de recursos por meio da tecnologia de *Cloud Computing* possibilita a oferta de capacidade de computação escalável e espaço de armazenamento sob demanda para análises de *Big Data*. Com vários recursos inteligentes conectadas à mesma nuvem que abriga vários sistemas de informação, um novo mundo de *IoT* e serviços é criado. A utilização da *Cloud*, portanto, oferece uma solução para aplicação de *Big Data*, já que tanto a capacidade da nuvem quanto o espaço de armazenamento podem ser dimensionados sob demanda (WANG *et al* 2016).

Em seu trabalho, Haddud e Khare (2020), cometam que a *Cloud Computing* foi classificada como a quinta tendência tecnológica mais influente. Esta tecnologia tem

sido amplamente utilizada nas cadeias de abastecimento e continua mostrando um grande potencial para criar uma rede de maior valor. A *Cloud* oferece quantidades praticamente ilimitadas de armazenamento de dados, por esta razão, é possível usar as informações adquiridas para construir algoritmos complexos que usam dados históricos (JAVAID *et al*, 2021). Por meio da *Cloud*, os recursos físicos do chão de fábrica estão conectados à terminais de supervisão e controle, esse ambiente possibilita o acesso remoto às informações das partes interessadas, que podem realizar interpretações dos dados, além de planejar estrategicamente e controlar os processos por meio de tablets, *smartphones* e outros dispositivos (MAYR *et al*, 2018).

3.3.6 AR e VR

Em relação à realidade aumentada (AR) e a realidade virtual (VR), um dos usos mais evidentes dessas tecnologias está relacionado à criação de simulações sobre situações perigosas, proporcionando ambientes de treinamento de baixo custo para manutenção e operação. Essas tecnologias têm o potencial de transformar completamente a forma como as pessoas trabalham e interagem umas com as outras (PEREIRA *et al*, 2019). O autor Yang (2016) faz a relação entre a aplicação da AR com o método *poka yoke*, comentado que, em um determinado posto de trabalho mesmo que o método esteja totalmente implementado, um aumento de variantes e volatilidade leva a um aumento da complexidade, o que pode resultar numa diminuição do índice de qualidade neste posto de trabalho. A utilização da AR, por exemplo, como um sistema de suporte, tem o potencial de melhorar a qualidade do processo, porque a cada etapa de montagem há o monitoramento em tempo real das atividades e os erros são rapidamente solucionados.

De Assis *et al*, (2022) citam uma série de benefícios em seu trabalho relacionando a AR e VR no trabalho das pessoas, dentre eles estão: eficácia do treinamento, melhorias na instrução e supervisão dos operadores, maior facilidade no desempenho de tarefas, diminuir o número de erros, aumento da segurança, melhorar o desempenho e aumentar a satisfação do trabalhador, melhorar a comunicação de informações entre operadores, apoiar a tomada de decisões, facilitar a identificação de erros e facilitar o fornecimento de informações. A VR pode ser usada para simular linhas de produção reais, a fim de identificar problemas de fabricação e gargalos que podem ser testados virtualmente para encontrar uma solução adequada. Na VR, a

simulação é sobreposta à perspectiva do mundo real e quando integrados a AR, os dados de fabricação em tempo real coletados durante os processos de produção permitem uma interação intuitiva e eficiente entre o usuário e a máquina inteligente, diminuindo os erros de fabricação (TURNER, 2016).

3.3.7 Robôs colaborativos

A robótica autônoma e colaborativa tem grande potencial para desenvolver locais de trabalho híbridos onde humanos e robôs trabalham juntos. Embora esses locais de trabalhos híbridos tenham grande potencial para aumentar a flexibilidade e a produtividade da produção, eles ainda enfrentam inúmeros desafios, principalmente em termos de segurança (PEREIRA *et al*, 2019). Considerações econômicas, saúde ocupacional (ergonomia e fatores humanos) e uso eficaz do espaço da fábrica desempenham um papel importante na decisão de usar sistemas humanos-robôs colaborativos. Outro benefício é a redução da complexidade na programação do robô em ações necessárias para concluir uma tarefa (GRAVEL e NEWMAN, 2001).

O operador colaborativo utiliza robôs colaborativos para realizar atividades conjuntas (ROMERO *et al*, 2016). Neste mesmo sentido, De Assis *et al*, (2022) citam os benefícios da robótica colaborativa: as tarefas para os operadores são simplificadas, os operadores são substituídos nas atividades menos ergonômicas, aumento da produtividade, uma melhoria na segurança operacional, minimiza erros, minimiza o trabalho manual e auxilia os funcionários com limitação física. Por fim, Fechter *et al*, (2016) contribuem afirmando que o principal benefício dos sistemas colaborativos é sua adaptabilidade, pois, teoricamente, podem ser colocados em outras áreas com maior facilidade e rapidez, pois não requerem sistemas rígidos de segurança. Como resultado, eles podem funcionar bem em situações em que o *layout* de produção precisa mudar com frequência.

3.3.8 Wearables

De Assis *et al*, (2022) contribui com os benefícios atribuídos aos operadores com a utilização de *wearables*, citando: possibilidade de aprimorar treinamentos e simulações, monitorar a localização dos trabalhadores em tempo real, aumentar a segurança no local de trabalho, melhorar a precisão da movimentação, auxiliar na tomada de decisões sobre ações relacionadas à saúde e melhorar as condições de trabalho do operador. Neste mesmo sentido, Pereira *et al*, (2019) citam operadores

inteligentes onde o Andon poderia ser acionado pelo uso de *smartwatch* destes operadores. Por fim, Romero *et al*, (2016) afirmam que o operador saudável usa *wearables* para medir condições relacionadas à saúde, localização e dados pessoais.

Contribuem Kolberg e Zühlke (2015), afirmando que o uso de dispositivos inteligentes permite que os operadores recebam mensagens de erro ou falha em tempo real. Essa sistemática consiste em um método Andon que notifica o operador o mais rápido possível, promovendo ações de reparo e reduzindo o tempo de atraso. Além disso, os *wearables* baseados em AR e CPS podem fornecer informações aos operadores sobre o tempo de ciclo e tarefas a serem executadas para apoiar a produção JIT. Trajes inovadores de captura de movimento ajudam a construir um modelo humano totalmente digital que pode ser analisado em VR, além dos aspectos puramente ergonômicos, as etapas de trabalho podem ser testadas e simuladas (DOMBROWSKI *et al*, 2019).

3.3.9 Exoesqueletos

Pacífico *et al*, (2023) comentam que quando intervenções ergonômicas convencionais como a mudança de *layout* ou soluções robóticas não podem ser utilizadas ou necessitam de tempo elevado para serem implementadas, a utilização de exoesqueletos pode ser uma solução adequada para melhorar as condições de trabalho. O conhecimento dos efeitos dos exoesqueletos em partes específicas do corpo e a seleção adequada das atividades podem ser benéficas para projetar locais de trabalho adequados e saudáveis (ONOFREJOVA *et al* 2022). Os Exoesqueletos colaboram com o seu usuário reduzindo a carga, potencializando as capacidades físicas e resolvendo possíveis problemas ergonômicos que possam surgir ao usar e trabalhar com ferramentas (DE LOOZE, 2016; BALDASSARRE *et al* 2022).

Romero *et al*, (2016) consideraram diferentes capacidades dos trabalhadores que podem ser habilitadas pelas tecnologias da I4.0. O operador de superforça considera tecnologias como exoesqueleto para suportar atividades físicas, aumentando força e resistência. De Assis *et al*, (2022) contribuem com os benefícios atribuídos aos operadores com a utilização de exoesqueletos, citando: Melhora na produtividade do operador mantendo sua segurança, ajuda ergonômica no levantamento de peso e sobrecarga, redução do esforço físico do operador e redução de acidentes de trabalho.

Atualmente, a maioria dos estudos sobre exoesqueletos demonstra resultados promissores. Maurice *et al*, (2019) investigaram o exoesqueleto para trabalhos acima da

altura da cabeça e foi possível reduzir efetivamente o esforço físico e a fadiga. No estudo de Moeller *et al*, (2022) uma revisão de 35 estudos foi realizada e 18 exoesqueletos diferentes foram examinados. A maioria dos exoesqueletos sustentava a articulação do corpo e eram usados para apoiar pessoas que trabalhavam no nível do ombro ou acima dele. De fato, 16 estudos revelaram atividade muscular reduzida após o uso do exoesqueleto.

3.3.10 Comunicação máquina a máquina (M2M)

A comunicação M2M tem sua origem nos sistemas de supervisão e aquisição de dados (SCADA), onde sensores e outros dispositivos conectados são usados com computadores para monitorar e controlar processos industriais (VERMA *et al* 2016). A tecnologia M2M ajuda a manufatura ao incorporar ainda mais inteligência artificial em objetos com o objetivo de possibilitar detecção, medição, controle, gerenciamento de energia, matéria-prima e recursos de comunicação (CHAKRAVARTHI 2021). Neste mesmo sentido, Potter (2013), afirma que para aumentar os benefícios por meio do acesso e distribuição de informações, uma rede M2M pode ser integrada a uma rede industrial, com isso, um grande número de informações pode ser gerado para prever e gerenciar a fábrica conectando os controladores de processo, bem como, outros sensores e máquinas pertinentes.

De Assis *et al*, (2022) abordam em seu trabalho o conceito de TPM 4.0 onde em um ambiente de comunicação integrada, as máquinas tornam-se independentes e inteligentes para poder identificar no sistema quando será necessário realizar sua manutenção e com isso, alocar os recursos de componentes e funcionários para realizar testes preditivos inteligentes de manutenção. Santos *et al*, (2021) também projetam o JIT no futuro sendo englobado pela integração M2M para auxiliar na estabilidade do controle em tempo real dos processos. Por fim, em seu estudo Nilsen e Nyberg (2016), comentam que há uma interface M2M dentro da empresa KUKA que é utilizada para reabastecer peças para a montagem dos robôs. Um robô móvel é conectado ao sistema de rede e ao sistema de manuseio de materiais. Utilizando informações deste sistema, o robô pode coletar e entregar peças para o posto de trabalho que se encontra ao seu lado.

A Manutenção Preditiva procura utilizar soluções necessárias para prolongar a vida útil de seus componentes evitando paradas não planejadas e minimizar paradas planejadas. A I4.0 na manufatura possibilita às empresas a oportunidade de usar a

tecnologia para monitorar e desenvolver uma maior compreensão de suas operações em tempo real, aumentando assim a produtividade e reduzindo custos. A comunicação M2M pode ser utilizada em conjunto com análise e tecnologias cognitivas para que as decisões relacionadas aos equipamentos sejam baseadas em dados e no prazo correto (DELOITTE, 2022). Buscando aproveitar ainda mais os benefícios do M2M, ele pode ser usado como um catalisador para a inovação empresarial, realizando análises que combinam informações de negócios com grandes quantidades de dados de máquinas. Possíveis exemplos incluem a análise de dados para realizar o “diagnóstico de falhas” e fazer melhorias para equipamentos, além disso, usar dados de máquinas e gerenciamento de produção para determinar os níveis de estoque ideais (SATO *et al*, 2014).

3.3.11 Sistemas de visão

Com o atual potencial em substituir os métodos de inspeção manual (visual), há uma ampla aceitação na utilização de sistemas de visão para avaliar a qualidade de uma variedade de produtos. Eles podem resultar em ganhos financeiros e totalmente automatizados de avaliação de qualidade, o que impacta diretamente na diminuição de erros e resultados inconsistentes. Seu uso também pode contribuir na diminuição do tempo necessário nas inspeções, com isso, o operador pode focar em atividades que agregam valor (VITHU e MOSES 2016).

Os avanços nas áreas de *Cloud Computing* também suportam as arquiteturas baseadas em sistemas de visão para diminuir o consumo e otimizar a alocação de recursos, garantindo decisões confiáveis. Na indústria automotiva, os sistemas de visão começaram a substituir ou complementar o trabalho humano usando o reconhecimento inteligente de padrões (KONSTANTINIDIS *et al*, 2021). No estudo de Bhullar *et al* (2021), a instalação de um sistema de visão em um fabricante de móveis mostra como, em uma situação complexa, o OEE pode ser melhorado em todos os cenários adversos (aumento de 2% no pior caso para 11% no melhor caso). Essa melhoria do OEE aumenta a capacidade da fábrica, sugerindo um aumento de 303 peças ou mais em um único turno. No cenário específico deste estudo, essa melhoria afeta um dos gargalos da fábrica, portanto a capacidade de toda a fábrica pode aumentar na mesma proporção, esta solução não afeta diretamente a disponibilidade de uma máquina, mas sim, a qualidade da linha de produção.

3.3.12 Veículos autoguiados (AGV/AMR)

A utilização de AGV's pode aumentar a produtividade, economizar tempo e prevenir doenças para os operadores. Além disso, pode ajudar na eliminação das perdas como estoque, espera e transporte, melhorar o rastreamento de materiais e minimizar os erros de atendimento de pedidos (DE ASSIS *et al*, 2022). Uma maior flexibilidade para os sistemas de produção pode ser fornecida pela descentralização do fluxo de material. No estudo de Fragapane *et al*, (2022) foi utilizada uma tecnologia emergente, os AMRs, em um sistema de produção, a fim de, transformar linhas de produção dedicadas em linhas de produção flexíveis e permitir a construção de mix de produtos.

Para Mayr *et al*, (2018) a capacidade dos AGV's de transferir itens dentro do fluxo de material reduz automaticamente o erro humano, bem como, as viagens desnecessárias. A possibilidade de ter um meio de transporte autônomo ou semiautônomo para curtas e longas distâncias é proporcionada pelos veículos autônomos. Eles representam uma inovação fundamental que pode auxiliar na gestão eficaz das linhas de produção, na gestão dos estoques e no apoio aos serviços logísticos internos e externos. Ainda neste sentido, Valamede e Akari (2020), comentam que os AGV's reabastecem as estações de trabalho de acordo com as necessidades exatas da linha de produção, reduzindo estoques, *lead times* e movimentações desnecessárias.

3.3.13 Simulação

A complexidade, capacidade de inovação e flexibilidade das características de produção podem ser facilmente abordadas por técnicas de simulação e otimização. Por outro lado, algumas ferramentas, como por exemplo, o VSM, não são projetadas para lidar com a variação e o comportamento estocástico de sistemas complexos e por isso, apresentam limitações. Mesmo assim, ao construir os modelos de simulação, os princípios Lean ainda devem ser levados em consideração. Portanto, combinar os dois será essencial (BAUERNHANSL, *et al*, 2014).

A simulação é uma modelagem baseada em sistema computacional que promove dados em tempo real para espelhar o mundo físico em um modelo virtual que inclui máquinas, produtos e pessoas. Essa simulação proporciona uma análise prévia de todas as etapas que compõem o processo, apresentando estimativas de desempenho para indicadores de produção. A aplicação da simulação tem trazido benefícios no que diz respeito à diminuição de tempo, especialmente nas etapas iniciais de criação de

produtos e processos. Ela possibilita a criação de protótipos virtuais, a validação de ideias, a realização de testes e a análise de projetos, evitando o surgimento de análises equivocadas e minimizando o surgimento de problemas (BAHRIN *et al*, 2016).

Utilizando simulações de cenários, é possível reduzir o tempo de espera, utilizando como base, informações atualizadas em tempo real dos ativos (DELOITTE, 2020). A constante transformação de dados em informações ao longo de todo o fluxo de produção é essencial para a criação de novos projetos que utilizam a simulação. Essa tecnologia é capaz de apresentar múltiplas perspectivas de contextos produtivos, que antecipa soluções e prevê o comportamento da produção para reduzir gargalos (VALAMEDE E AKARI, 2020).

3.3.14 **Integração vertical**

Um dos princípios básicos da I4.0 é a adoção da integração vertical, que se refere à integração dos sistemas de informação de diferentes níveis hierárquicos de uma organização. Tem como objetivo fornecer suporte para tomada de decisões através de fluxos de dados em tempo real (TABIM *et al*, 2021). Uma possível forma de alcançar a integração vertical é por meio do uso coerente do MES e do ERP em um fluxo comum de informações automatizadas, a fim de alcançar produção inteligente (TAMAS e MURAR, 2019; GARROCHO *et al* 2020).

O caminho para a I4.0 começa com visibilidade e transparência, que é exatamente o objetivo alcançado com a implementação da integração vertical. Considerada o primeiro passo para a I4.0 em nível de fábrica, a integração vertical permite que máquinas inteligentes formem um sistema auto organizado, que pode ser reconfigurado dinamicamente para se adaptar a diferentes produtos. Com essa integração, as empresas obtêm um sistema de manufatura inteligente, transparente, preditivo e adaptável (SCHUH *et al*, 2020).

Segundo Albertin *et al* (2017), as informações coletadas pelos sensores possibilitam a transparência total do processo produtivo, visto que a integração vertical permite a formação de um sistema auto organizável de máquinas inteligentes e conectadas que podem ser reconfiguradas dinamicamente para se adaptar a diferentes tipos de produtos. Isso resulta em um sistema flexível e reconfigurável, onde as informações coletadas são analisadas para otimizar o processo produtivo. Portanto, para atender as demandas personalizadas e de pequenos lotes, é essencial que a I4.0 integre

verticalmente os subsistemas hierárquicos, transformando a fábrica tradicional em um sistema de manufatura altamente flexível e reconfigurável (WANG *et al* 2016).

3.3.15 Sistemas ciber-físicos

No trabalho desenvolvido por Pereira *et al* (2019), vários autores citam a importância dos sistemas ciber-físicos (CPS) para potencializar as práticas Lean. Os CPS fornecem dados em tempo real que podem ser usados para fornecer feedback em tempo real sobre o desempenho (KPI's) e fornecer transparência e melhor comunicação entre as partes interessadas da produção. Essa tecnologia pode ser útil para simplificar o uso dos sistemas *Andon* e *Kanban* eletrônico, bem como outras técnicas de controle de fluxo de produção. Em termos de manutenção, os CPS são capazes de coletar dados sobre requisitos de manutenção e enviar alertas automaticamente para as equipes de manutenção.

No trabalho de Wagner *et al*, (2017) é proposta uma solução de *Just in time* ciber-físico projetado para suportar o processo de fluxo de material. A solução utiliza *big data*, *data analytics* e integração vertical. O ponto de partida foi substituir os cartões *Kanban* pela integração vertical criando assim, um fluxo de informações entre ordem de fabricação, entrega de material, estoque de material e consumo de material, bem como, um pedido de compra automático para o fornecedor. Neste ponto foi necessário para a implantação, um redesenho do banco de dados do sistema de execução da manufatura (MES). O fluxo de material foi alterado para uma entrega nas máquinas sem estoques no chão de fábrica. Cada movimento de material é detectado por sensores e enviado para uma arquitetura de *Big Data*. O material necessário é solicitado via ordem de fabricação e combinado com o estoque de material no depósito.

3.4 TOC – 5 ETAPAS DE FOCALIZAÇÃO

O termo “restrição” tem origem na Teoria dos Sistemas: Um sistema é uma totalidade de funções interdependentes que convertem entrada em saída. Uma “restrição” é um dos poucos fatores que limitam o desempenho do sistema, ela é o elo mais fraco de uma cadeia. A TOC aplica esses princípios aos sistemas de negócios e usa as restrições como pontos de partida para mudanças efetivas, pois é aqui que o maior efeito de alavancagem pode ser alcançado pois as mudanças nas restrições afetam toda a organização. A TOC auxilia as empresas no aumento do lucro usando seus valiosos recursos existentes, evitando a diminuição de capital por meio de reestruturações e

fazendo mudanças e investimentos apenas em áreas onde realmente é necessário (TECHT, 2015).

Segundo Cox e Schleier (2013), a estratégia da TOC tem mais a ver com a decisão de se concentrar na área-chave de uma organização do que com a realização de muitas tarefas. A TOC afirma que todo sistema complicado contém uma simplicidade inerente, isso significa que apenas algumas restrições podem realmente determinar o quão bem um sistema funciona. Reconhecer a existência de uma restrição cria todo um novo paradigma de gestão, em vez de, considerar qualquer nova ideia de melhoria em qualquer lugar como uma melhoria para a organização, os esforços de melhoria devem se concentrar na restrição. Os cinco passos de focalização identificam e exploram a simplicidade inerente em qualquer organização por meio de um processo que engloba as seguintes etapas:

1. Identificar a restrição do sistema.
2. Decidir como explorar a restrição do sistema.
3. Subordinar todo o resto à decisão anterior.
4. Elevar a restrição.
5. Retornar ao primeiro passo. Advertência: Não permitir que a inércia se torne a restrição do sistema.

Techt (2015), detalha estas 5 etapas considerando os seguintes pontos. Para o passo 1 enquanto a restrição não for encontrada, cada tentativa de melhoria será como tropeçar no nevoeiro. A liderança e funcionários de uma empresa sabem onde está localizada a restrição, basta realizar as perguntas certas, além disso, se deve ter cuidado com o pensamento de que pode haver mais de uma restrição. No passo 2 depois de descobrir a restrição, a primeira ação não deve ser removê-la, ou seja, ampliá-la, a expansão de uma restrição tem um custo elevado e há uma boa probabilidade de que ela não esteja sendo totalmente utilizada naquele momento. Portanto, primeiro é importante determinar se a restrição está sendo utilizada em todo o seu potencial. Um exemplo de uso indevido de uma restrição pode ser, no caso de um recurso de produção, haver períodos de ociosidade. Se for um recurso de projeto, períodos com necessidade de multitarefas. Já em serviços, perda de vendas por falta de produtos. Depois disso, você deve avaliar como garantir que a restrição de receita da sua empresa seja utilizada da melhor forma possível.

Para o passo 3 se pode imaginar uma área de produção (A) que precisa inserir processos de configuração adicionais para que uma outra área (restrição B) seja usada de maneira ideal. A área A, agora é menos produtiva visto localmente, mas a sua produtividade continuará sendo medida. Isso significa que a análise na área A precisa ser diferente, ou seja, todas as regras, KPI'S, mecanismos de controle, devem ser verificados e adaptados. Isso é trabalhoso e muitas vezes bastante difícil, pois exige questionar paradigmas profundamente arraigados. Em relação à etapa 4 considerando as etapas anteriores, na maioria dos casos são consideradas medidas ou indicadores organizacionais que normalmente não exigem custos ou investimentos. Somente quando for necessário elevar a restrição com novos equipamentos ou novos funcionários, será possível sentir a despesa, é por isso que a decisão de elevar a restrição só deve ser implementada depois de dar os passos 2 ou 3 e, mesmo assim, somente se tiver certeza de que valerá a pena. Por fim, a restrição pode mudar após as etapas 2 ou 3, porém é bastante provável que ela aconteça na etapa 4. Se a restrição mudou e você não realiza ações, a taxa de produtividade não aumenta, acaba estagnando apenas em um nível mais alto do que anteriormente (TECHT, 2015).

A produção tem que contribuir para o sucesso do negócio, isso acontece quando é eficiente, ou seja, quando cada recurso é usado em sua capacidade e funcionando com eficiência. As consequências do ótimo local, no entanto, são baixa confiabilidade de entrega, reclamações de clientes, longos prazos de entrega, estoque excessivo e capital vinculado de longo prazo TECHT (2015).

3.5 VALIDAÇÃO ECONÔMICO FINANCEIRA

Uma das principais decisões para o sucesso e continuidade de uma empresa é a escolha quanto ao investimento que possui. Pode ser citado o investimento no mercado financeiro, ampliações de fábricas ou novas unidades produtivas, projetos de reorganização ou novas campanhas de marketing. Em todos os casos, temos em comum a existência de desembolso de caixa, investimentos feitos para obtenção de benefícios futuros, seja por aumento das receitas ou pela diminuição das despesas (GOMES, 2013). A escolha de investir o capital é feita em um processo que envolve a geração e avaliação de diversas alternativas que atendam às exigências técnicas dos investimentos. Após relacionar as alternativas tecnicamente viáveis, se determina quais delas são financeiramente atrativas (SOUZA, 2015).

Os indicadores de análise de projetos podem ser divididos em duas categorias principais: os relacionados à rentabilidade do projeto (ganho ou geração de riqueza) e os relacionados ao seu risco. Na primeira categoria estão o Valor Presente Líquido (VPL), o Valor Presente Líquido Anualizado (VPLa), o Índice Benefício/Custo (IBC) e o Retorno Adicional sobre o Investimento (ROIA). Na segunda categoria estão a Taxa Interna de Retorno (TIR), o Período de Recuperação do Investimento (*Payback*) e o Ponto de Fisher. Esses indicadores auxiliam na percepção do comportamento esperado entre risco e retorno, ou, mais especificamente, maiores riscos implicam em aumento do retorno esperado (SOUZA, 2015).

Ainda neste sentido, Souza (2015), aborda um conceito importante que precisa ser citado, a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), que é a melhor taxa com baixo risco disponível para aplicar o capital. Na avaliação de um investimento, normalmente existem duas opções: investir no projeto ou “investir na Taxa Mínima de Atratividade”, visto que, o capital para realizar o investimento está aplicado à TMA. Com isso, é preciso considerar os benefícios adicionais que virão da aplicação de capital na TMA. Essa ideia é conhecida como lucro residual e os economistas a defendem há muito tempo. Uma variação desse conceito tem sido tratada como Valor Econômico Agregado ou *Economic Value Added* (EVA).

Com a TMA, temos uma ótima forma de avaliar a viabilidade econômica de um projeto, pois mostra aos tomadores de decisão se o esforço exigido por um projeto se justifica pelo retorno que ele espera. Pode-se até afirmar que se assemelha à ideia de custo de oportunidade, pois esse indicador ajudará o gestor a decidir se mantém os recursos na operação atual ou os transfere para o potencial investimento ou projeto, pois a TMA literalmente exhibe o quão atrativo é o projeto. Ao analisar as finanças de um projeto, a TMA conecta-se com o VPL, ele funciona como um complemento da TMA porque, se a TMA revelar a viabilidade do projeto, a VPL projetará qual ganho, ou qual valor, o projeto provavelmente produzirá ao longo de um determinado período (JUNIOR, 2021).

O VPL é uma técnica muito conhecida e utilizada. Como o próprio nome indica, nada mais é do que a concentração de todos os valores esperados de um fluxo de caixa na data zero. Para tal, usa-se como taxa de desconto a TMA (VANNUCCI, 2013; SOUZA, 2015). O projeto é aceito se o valor for maior que zero, e quanto maior o valor,

mais aceitável é o projeto, pois terá maior retorno. O fato de ser maior que zero significa que o valor presente dos benefícios supera o valor presente dos custos, no entanto, se o valor for inferior a zero, a proposta deve ser rejeitada, uma vez que implicaria custos superiores aos benefícios para a empresa. Na terceira alternativa, se o valor for igual a zero, a empresa pode ficar indiferente ao projeto porque esta taxa é a mínima que ela exige em qualquer outro projeto (GOMES, 2013; JUNIOR, 2021). A referência não é suficiente quando analisada isoladamente, para saber se um projeto é atrativo ou não e se o valor é suficiente, se torna necessário recorrer a outros indicadores (SOUZA, 2015).

Às vezes, especialmente para projetos com amplos horizontes de planejamento, interpretar o valor monetário do VPL apresenta desafios de comparação. Por isso, é possível considerar o uso de um VPL médio (equivalente) para cada um dos períodos de tempo (anos) do projeto. É mais fácil para um tomador de decisão analisar em termos de ganho por período (semelhante ao conceito de lucro contínuo por período) do que em termos de ganho acumulado ao longo do tempo. A VPLa, também conhecida como Valor Anual Uniforme Equivalente (VAUE), é uma variação do VPL. Enquanto o VPL concentra todos os valores do fluxo de caixa na data zero, o VPLa transforma o fluxo de caixa representativo do projeto de investimento em uma série uniforme (SOUZA, 2015; JUNIOR, 2021).

Para determinar se um investidor está investindo alto e ganhando uma quantia muito baixa, ele pode usar o Índice de Benefício/Custo (IBC), que pode determinar a rentabilidade do negócio. Por sua natureza e pelo que oferece aos investidores, também recebe o nome de índice de Lucratividade, que informa quanto um investimento de determinado valor gera de retorno. Genericamente, o IBC nada mais é do que uma divisão entre o Valor Presente do Fluxo de Benefícios pelo Valor Presente do Fluxo de Investimentos necessários para realizá-lo e seu principal objetivo é revelar se o retorno será o mesmo, maior ou menor do que o valor investido. Quando um investidor sabe que tipo de retorno seu investimento inicial proporcionará e qual será o tamanho desse retorno, ele está em condições de tomar uma decisão. Se um mercado tiver margens de lucro pequenas e restritas, um investidor pode encontrar um IBC baixo e positivo e mesmo assim, decidir prosseguir com o investimento (SOUZA, 2015; JUNIOR, 2021).

Um índice percentual derivado do IBC e que também apresenta uma excelente informação para a tomada de decisão para o investidor é o Retorno Adicional sobre o Investimento (ROIA), que, quando finalizado, já traz descontado a TMA. Representa, em termos percentuais, a riqueza gerada pelo projeto. Assim, o ROIA é o análogo percentual do conceito de Valor Econômico Agregado (EVA) (SOUZA, 2015; JUNIOR, 2021).

Entrando no campo da engenharia econômica, a TIR é uma medida utilizada na engenharia econômica que analisa a taxa de desconto que faz com que o VPL seja zero. É frequentemente usado para comparar investimentos e até mesmo serve como uma ferramenta para classificar os níveis de desvalorização monetária. Ainda pode ser citado que a alíquota obtida funciona como uma métrica de atratividade, por exemplo, se um investimento tiver uma TIR inferior à TMA em termos percentuais, o investidor rejeitará rapidamente o investimento, portanto, com uma TIR maior que uma TMA, o projeto tem maior probabilidade de ser aprovado. Porém, mesmo com essa vantagem, o investidor deve ponderar na hora de tomar decisões, pois o perfil do investidor é sempre levado em consideração (JUNIOR, 2021). Um dos enganos mais comuns é referir-se à TIR como a rentabilidade do projeto, pois o retorno do projeto só será obtido se os recursos liberados puderem ser reinvestidos a uma taxa igual à TIR (SOUZA, 2015).

Continuando nesta mesma abordagem Souza (2015), comenta que o *payback* é outro indicador importante para projetos. Este indicador torna-se significativo no processo de decisão de investimento em contextos dinâmicos, como das economias globalizadas, visto que, a tendência da economia é de mudança contínua e intensificada e não vale a pena esperar muito para recuperar o capital investido. Contribuindo com o autor, Gomes (2013), comenta que o *payback* é o número de períodos necessários para que o somatório dos fluxos de caixa dos períodos seja igual a zero. Se os fluxos de caixa forem anuais e o somatório for zero no quinto período, diz-se que o investimento retornou em 5 anos ou que o período de recuperação do capital é de 5 anos. Junior (2021), complementa que ao analisar se um investimento vale a pena ou não, a análise do indicador sozinho não é recomendada, em vez disso, deve ser usado para ajudar o investidor a entender se o investimento se ajusta às suas circunstâncias. O *Payback* indica por quanto tempo os recursos investidos serão retidos na transação concluída e quanto menor for a duração, melhor para o investidor.

O método do Ponto de Fisher pode ser utilizado para outra análise da dimensão do risco. Nessa análise, Fisher previu a existência de um limite para a variabilidade da TMA em que o investidor seria indiferente entre duas alternativas de investimento em termos de ganho. Este limite foi determinado tendo em conta o comportamento normativo da relação risco-retorno (mais ganhos só assumindo mais riscos). Já para o investidor ficar desinteressado, ambas as opções devem ter o mesmo VPL. Ao se igualar as expressões dos VPLs resulta um fluxo de caixa igual à diferença dos fluxos de caixas originais que deve ser igualado a zero. A taxa que torna um fluxo de caixa qualquer igual a zero é, por definição, a TIR desse fluxo (SOUZA, 2015).

4 PROPOSTA DA ESTRUTURA CONCEITUAL

4.1 O LEAN E A INDÚSTRIA 4.0

A competitividade global que o mercado vem impondo às empresas ao longo dos anos acaba promovendo a busca por sistemas de gestão que auxiliem na redução dos custos, no aumento de produtividade e na melhoria das eficiências de produção. Com isso, o Lean vem sendo amplamente implementado em empresas de todos os setores. Devido a essa importância a base que compõem a estrutura conceitual proposta neste trabalho está relacionada às perdas do Lean.

No entanto, é possível identificar visões equivocadas sobre o assunto. Existem afirmações que o Lean é somente um conjunto de métodos e aplicação de ferramentas. O Lean é mais do que apenas ferramentas, é um sistema de gestão, que inclui princípios e práticas de melhoria. Como já citado anteriormente, o objetivo mais importante do STP que posteriormente, foi difundido com o termo “Lean”, tem sido aumentar a eficiência da produção pela eliminação das perdas, ao fazer isso, o Lean permite respostas mais rápidas às mudanças nas demandas dos clientes e resulta em uma produção mais robusta, com maior qualidade, flexibilidade e menor custo.

Inicialmente a Toyota categorizou sete tipos de perdas que não agregam valor nos processos de produção. Além das sete perdas clássicas, foi incluído por Liker em 2007 a 8ª perda que está relacionada a perda intelectual, por não ouvir ou não dar condições ideias de trabalho às pessoas. Essas perdas são a base para identificar oportunidades de melhorias e o objetivo do Lean é eliminá-las para otimizar o fluxo de valor, reduzir custos, melhorar a qualidade e a satisfação do cliente. A figura 10 mostra as perdas que são consideradas neste trabalho:

Figura 10: Perdas do Lean



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Quando as empresas não entendem ou não aderem às práticas Lean, elas podem acabar aumentando os custos, pois as perdas não serão reduzidas e os processos não serão melhorados. Além disso, a ineficiência pode resultar em menor produtividade e qualidade inferior, o que pode afetar a reputação da empresa e gerar insatisfação dos clientes. Outro fator importante é a falta de treinamento adequado dos funcionários, sendo assim, é essencial que as empresas entendam os princípios básicos do Lean e implementem as práticas corretamente para obter os melhores resultados.

Em relação à I4.0, três principais modelos foram utilizados neste trabalho como referências para auxiliar na construção do que está sendo considerado na estrutura conceitual. A construção está considerando duas abordagens em relação às tecnologias, sendo elas, as tecnologias de base e tecnologias de *front*. Neste sentido, no trabalho de Frank *et al*, (2019) no modelo dos 4 *Smarts*, as tecnologias de base impulsionam a transformação digital e diferenciam o que é a I4.0 em relação aos estágios anteriores do desenvolvimento industrial. As tecnologias de base consideradas pelos autores são *IoT*, *Cloud*, *Big Data*, *analytics* e inteligência artificial. Corroborando com essa afirmação, Gallo *et al*, (2021) afirmam que na base da Indústria 4.0 estão a *IoT* e o *Big Data*, sem os quais as empresas não poderia nem iniciar o processo da quarta revolução industrial.

Essas tecnologias são aquelas que podem ser identificadas como as “tecnologias básicas” da I4.0.

O modelo de Scheer (2015) cita a necessidade e importância da utilização de materiais inteligentes no contexto da I4.0, para isso, os materiais são descritos como inteligentes se carregam consigo suas propriedades, como qualidade e etapas de fabricação, em um sistema de armazenamento de dados (chip). Por meio das tecnologias de identificação por radiofrequência (RFID), esses materiais podem navegar pelo processo de fabricação de forma praticamente independente. Outro ponto importante citado pelo autor é a utilização de *Big Data* que possui um alto poder de armazenamento de dados e que tem relação com os sensores, onde estes, podem medir o status em tempo real de máquinas, materiais e periféricos.

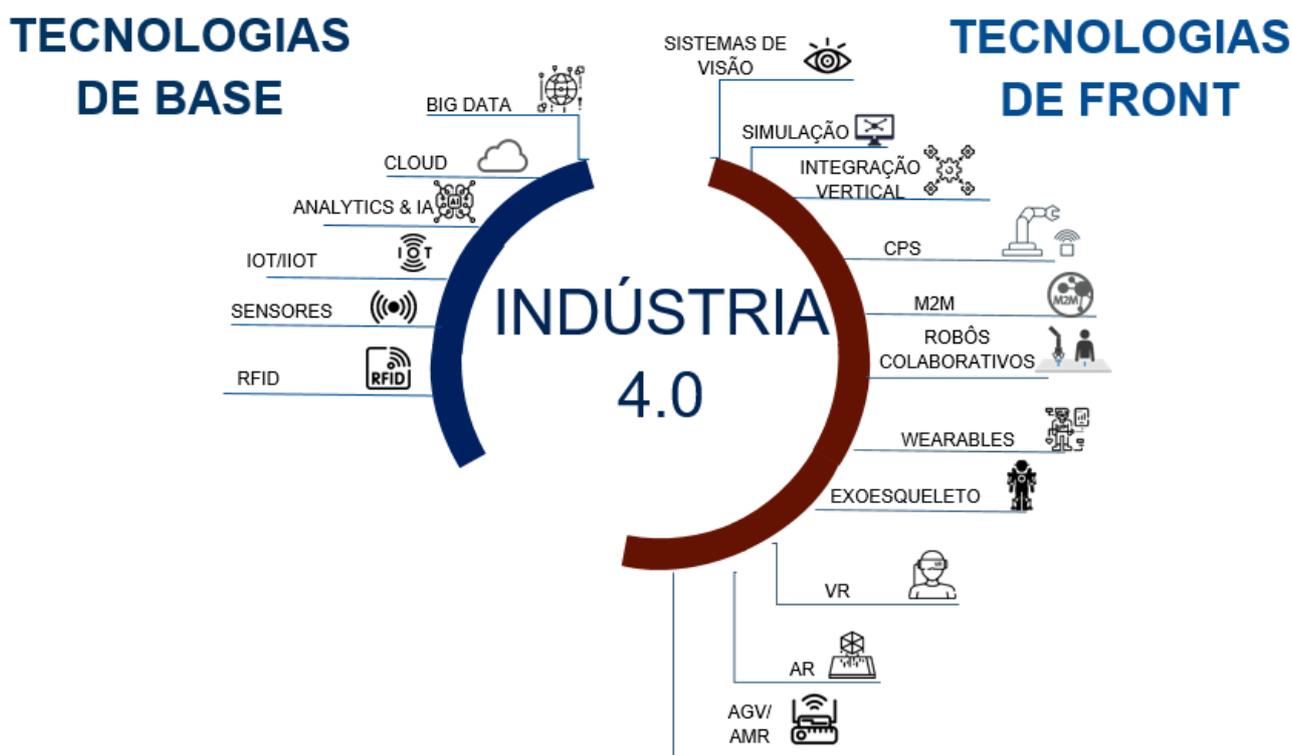
Em relação às tecnologias de *front*, o modelo de Frank *et al* (2019) aborda 4 dimensões diferentes, separadas em dimensões internas (*Smart Manufacturing e Smart Working*) e dimensões externas (*Smart Supply Chain e Smart Products e services*). As duas dimensões que tem maior relação com este trabalho são o *Smart Manufacturing* e o *Smart Working*. O *Smart Manufacturing* aborda a utilização dos conceitos do CPS, inteligência artificial e ciência de dados, além disso, pode ser citado as tecnologias de comunicação M2M, integração vertical de sistemas de informação e robótica avançada/colaborativa. Também podem ser considerados os conceitos de manutenção inteligente por meio da utilização de IA para antecipar desligamentos e prever falha, e por fim, a AR e VR para construção de cenários de manufatura, a simulação de processos e a utilização de AGV's.

A dimensão do *Smart Working* considera o conceito do operador 4.0, utilizando tecnologias para melhorar o desempenho e o potencial dos funcionários. As tecnologias dessa dimensão podem impactar na tomada de decisão, na busca por conhecimento, promover a criatividade, aumentar a segurança e satisfação. Podem ser citadas as tecnologias de AR, VR, *wearables* (óculos inteligentes ou rastreadores) e exoesqueletos. Os robôs colaborativos também são citados com o objetivo de trabalhar em conjunto com os operadores, possibilitando auxiliar em atividades repetitivas ou de alto risco para a segurança.

Scheer reforça em seu modelo a importância dos CPS para a “*Smart manufacturing*”, onde é possível obter maior flexibilidade e com isso trabalhar com

lotes menores, podendo chegar ao conceito de *one piece flow*. Em relação ao modelo da Acatech, a estrutura conceitual deste trabalho não faz uma relação direta no nível de tecnologia, porém ela é importante quando se trata da escolha e classificação das tecnologias em base e *front* buscando atingir os seis níveis propostos de maturidade. Além disso, o modelo auxilia a gerar uma reflexão sobre qual o nível de maturidade é o ideal para o momento da empresa. Por exemplo, o nível de visibilidade pode ser suficiente para que a empresa obtenha resultados que antes não eram possíveis, visto que, ela não possuía dados confiáveis e disponíveis em tempo real. Essa reflexão é importante pois impacta diretamente no investimento despendido pela empresa nos projetos que ela se propõe a implementar. Com base nas descrições em que as principais referências foram citadas, na figura 11 se mostra a construção que o trabalho está considerando para a análise das tecnologias da I4.0:

Figura 11: Tecnologias da I4.0

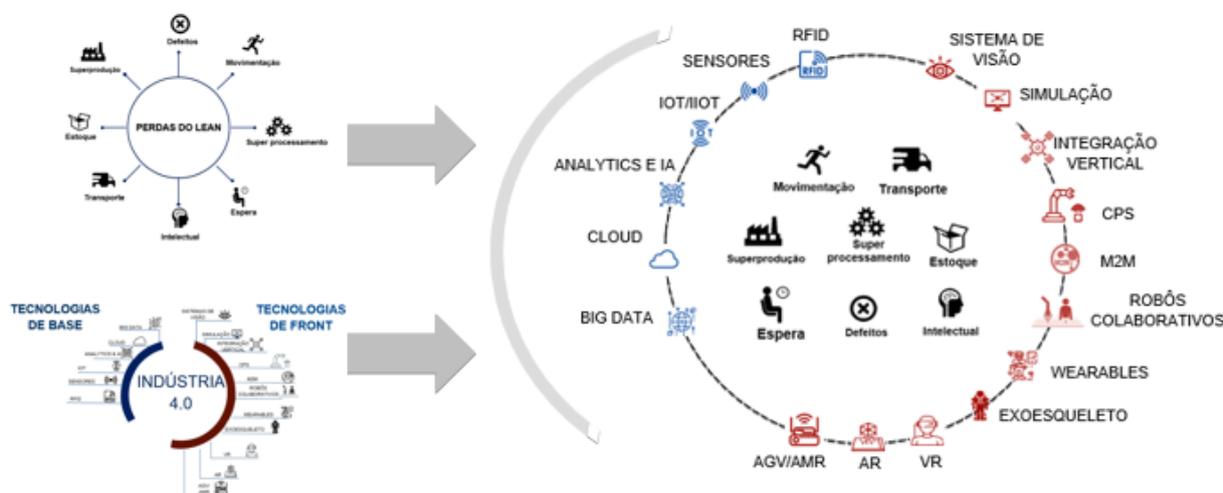


Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

O Lean Digital não tem o objetivo de buscar novos princípios para o Lean, em vez disso, fortalece os princípios enxutos existentes buscando potencializar suas aplicações. O Lean Digital utiliza as tecnologias da I4.0 para fornecer informações mais precisas, oportunas e relevantes sobre as operações. Além disso, o aumento do acesso a

dados em tempo real que as tecnologias da I4.0 possibilitam, combinado com o aumento do poder de processamento, permitiu novas análises e percepções que eram praticamente impossíveis alguns anos atrás (DELOITTE, 2020). O Lean digital auxilia as empresas a se adaptarem às mudanças e a ajustar rapidamente seus processos, melhorando assim, seus serviços e experiências, a produtividade e a satisfação do cliente. A figura 12 ilustra o conceito do Lean Digital, conectando cada uma das perdas do Lean com as tecnologias da I 4.0:

Figura 12: Conexão entre perdas e tecnologias da I4.0



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

O Lean pode se beneficiar da introdução da tecnologia ao criar um ambiente onde pessoas e máquinas possam colaborar de forma mais eficaz. A captura e análise de dados em tempo real permite que o Lean otimize processos e identifique áreas para melhoria. Esses dados podem ser usados para ajudar no planejamento e programação da produção, gerenciamento de recursos, melhoria de processos e controle de qualidade, entre outras coisas.

O Lean Digital enfatiza a importância das pessoas além dos benefícios da tecnologia. A tecnologia não pretende substituir as pessoas, mas sim permitir que trabalhem de forma mais eficaz e eficiente. O sucesso do Lean Digital ainda depende das pessoas, pois elas são responsáveis pela criação, utilização e manutenção da tecnologia, isto requer treinamento e desenvolvimento, assim como um forte foco em segurança e ergonomia.

4.2 PERDAS X TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0

Como citado anteriormente neste trabalho, um dos principais objetivos da estrutura conceitual é realizar a conexão das tecnologias da I4.0 na redução ou eliminação das perdas do Lean. Conforme as referências já abordadas que demonstraram os benefícios das tecnologias, nesta etapa, se faz a relação detalhada em cada uma das perdas. Vale salientar que a *Cloud*, o *Big Data* e o *analytics* e IA por tratarem da coleta, armazenamento e análise de dados, acabam se relacionando com as perdas da mesma forma. Para as demais tecnologias de base e para as tecnologias de *front*, é necessário maior detalhamento, sendo assim, as relações estarão descritas em cada perda.

Em relação à perda de transporte, além da *Cloud*, *Big Data e Analytics* e IA, as tecnologias de base que tem relação com esta perda são o RFID, os sensores e IOT. A parte de sensores e dispositivos IOT fortemente relacionado aos dados que os recursos enviam para o sistema e podem ser combinados com *Big Data e Analytics*, realizando o armazenamento dos dados e análises de padrões que auxiliam na previsão da demanda e no planejamento logístico. O RFID pode ser utilizado para o monitoramento em tempo real dos materiais ou modais logísticos e auxiliar no processo de abastecimento e reabastecimento automático. Isso é possível pois os operadores podem receber instruções em tempo real sobre a localização exata de algum item, por exemplo. Além disso, as informações podem auxiliar a evitar erros ou transporte desnecessários, onde pode ocorrer do armazenamento de MP ou produto acabado estar sendo realizado no local incorreto.

Sobre as tecnologias de *front* que impactam nessa perda, a simulação pode ser utilizada para criar cenários de *layout* e com isso, definir as melhores rotas, rotinas e ritmos de abastecimento, além disso, reduzir ou eliminar a necessidade de transporte entre os processos. A AR pode ser utilizada para orientar o local exato de abastecimento ou retirada de material nos postos de trabalho. Os robôs AGV's ou AMR podem ser utilizados para criar um ambiente com maior segurança reduzindo os riscos de acidentes e lesões. Proporcionar maior flexibilidade onde os robôs podem ser programados para se adaptar às necessidades específicas e além disso contribuir para a redução de custo. A VR pode ser usada para criar modelos tridimensionais de armazéns ou instalações para realizar simulações e testes de operações antes de implementá-las na prática além disso,

pode ser utilizada para treinamento dos operadores dos modais. Sendo assim a relação das tecnologias para esta perda é ilustrada a seguir:

Figura 13: Perda de transporte x tecnologias da I4.0



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Em relação à perda de movimentação as tecnologias de base IOT, sensores e RFID tem basicamente o mesmo objetivo citado na perda de transporte. As informações que estas tecnologias geram, são utilizadas como *input* para as tecnologias de *front*. Os dados coletados via sensores e dispositivos IOT em máquinas e RFID em materiais servem como base para análises de aproveitamento de mão de obra, histórico de quantidade de matéria prima (MP) ou produto acabado disposto no *layout*. Já as tecnologias de *front* que podem ser utilizadas e que trazem benefícios são: a simulação, da mesma forma que para o transporte. Com o histórico de informações é possível obter análises e desenhar cenários melhores de desempenho com um *layout* otimizado. A AR pode ser utilizada para auxiliar nas etapas de realização de cada tarefa, ajudando o operador a manter o ritmo e não desviar do padrão estabelecido. A VR para simular novos projetos de *layout* onde o operador pode entender e construir as melhores opções conforme as oportunidades encontradas. O exoesqueleto pode ser utilizado para suportar em movimentações onde o operador precisa se deslocar com peças ou componentes com peso elevado, fazendo assim, com que o operador não esteja exposto a riscos de segurança. Por fim, os *wearables* podem ser utilizados para mapear movimentações desnecessárias ou ergonomicamente incorretas nos processos, a duração das atividades e fornecer informações para melhorias no *layout*.

Figura 14: Perda de movimentação x tecnologias da I4.0



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Para a perda relacionada a defeitos, as tecnologias de base suportam informações relacionadas à máquina, MP ou produto acabado. Com sensores e dispositivos IOT instalados nas máquinas é possível com *Analytics* e IA criar padrões que consigam prever quando há risco de quebra ou comprometimento no desempenho de um equipamento antes que ele aconteça. Essa predição tem relação direta em manter os produtos que estão sendo produzidos com a qualidade esperada. Em relação ao RFID pode ser utilizado na rastreabilidade interna ou externa de uma empresa nos seus lotes de produção, aumentando a velocidade e precisão em casos que sejam necessários ações de contenção, bem como, ajudar na identificação da fonte do problema e evitar futuros defeitos.

Como tecnologia de *front* o sistema de visão pode ser utilizado para fazer inspeções automáticas entre as etapas do processo ou ao final e garantir correções rápidas para que nenhum produto contenha defeitos. Pode ser utilizado também para garantir que as ferramentas que estão sendo utilizadas no processo estão corretas. Com a utilização de um sistema de visão a comunicação M2M pode ser utilizada para ajustar etapas do processo antes que ocorram defeitos, por exemplo, ao realizar a medição de um produto, o equipamento de medição mostra que a medida está próxima do limite superior ou inferior aceitável, então, esse equipamento pode enviar um sinal para que a máquina faça a correção em seus sistemas já para o próximo produto. Os robôs colaborativos podem ser utilizados em operações complexas e com alto nível de risco, com isso, mantendo a qualidade do processo e conseqüentemente do produto acabado. Os *wearables* podem estar conectados aos sensores das máquinas ou MP e podem monitorar as condições do equipamento, como temperatura, vibração e umidade, além disso, se há algum problema de qualidade e alertar o operador. A AR pode fornecer *feedback* em tempo real para os operadores, permitindo-lhes ajustar suas tarefas para evitar erros e problemas que podem levar a falha. Por fim a VR pode ser utilizada para

criar ambientes onde o operador possa treinar as operações no local atual de trabalho ou em projeções futuras.

Figura 15: Perda de defeitos x tecnologias da I4.0



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Para a superprodução, conforme já citado anteriormente na perda relacionada a defeitos, com as características que as tecnologias de base têm, é possível fornecer e analisar dados para entender seus padrões buscando criar formas de predição. No contexto desta perda, os dados terão maior impacto na programação da fábrica, além de possibilitar agilidade na tomada de ação e previsibilidade antes que defeitos em máquinas ou em produtos aconteçam. Essas características são muito importantes, pois, para que uma empresa trabalhe com sincronismo e evite a superprodução os seus processos precisam ser estáveis. Para as tecnologias de *front*, a simulação pode ser utilizada para criar cenários de sincronismos na produção com o objetivo de equilibrar o sistema e como consequência evitar que a superprodução aconteça. A comunicação M2M pode ter uma importante função, onde as máquinas se comunicam e evitam que etapas do processo enviem MP sem necessidade, além disso, como já citado também, podem ajustar os processos para evitar defeitos e por consequência manter o sistema estável. As informações geradas pelas tecnologias de base têm um papel fundamental no conceito da integração vertical, por exemplo, as informações de eficiência de máquinas e fluxo de produção sobre MP ou produto acabado, podem ser integrados em uma plataforma de gerenciamento de dados, permitindo que a equipe de gerenciamento visualize e analise os dados em tempo real. O envio das informações coletadas à plataforma de gerenciamento de produção, pode ser utilizada para definir a produção e evitar a superprodução. Com as informações sendo geradas e compartilhadas nos diferentes níveis de uma empresa, se obtém o CPS, que combina os componentes físicos, como sensores, dispositivos RFID ou IOT com componentes virtuais, como IA e *software* que coletam, processam e transmitem informações em tempo real.

Figura 16: Perda de superprodução x tecnologias da I4.0



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

As tecnologias de base no super processamento oferecem uma visibilidade aprimorada sobre as etapas do processo de produção, além disso, capturar, armazenar e analisar as informações obtidas pelas tecnologias de *front*. A utilização de IOT, sensores e RFID podem fornecer informações das condições ideais de processamento em equipamentos e etapas de movimentação ou armazenamento de MP. Em relação às tecnologias de *front*, o sistema de visão pode ser utilizado para verificar se a quantidade de pessoas contidas na área de trabalho está conforme o padrão estabelecido, além disso, pode monitorar os movimentos executados pelos operadores e enviar sinais se algo estiver fora do padrão. O uso da simulação neste caso, pode auxiliar no comparativo entre tempo de ciclo teórico e tempo de ciclo real. Caso o número real seja maior que o teórico proposto, se deve entender os motivos, pois existe a possibilidade de a máquina estar realizando etapas que não são necessárias ou o operador estar realizando excesso de movimentos ou inspeções. Outra oportunidade que pode ser citada é a utilização de robôs colaborativos que podem ser programados para executar exatamente o que deve ser feito, sem etapas adicionais ao processo. Além disso, o uso de AR pode auxiliar o operador quando alguma etapa desnecessária está sendo executada e mostrar qual etapa ele deve seguir. Por fim, a VR pode ser utilizada para o aprimoramento em ambientes virtuais que replicam exatamente o posto de trabalho físico, assim os operadores podem ser treinados e pode ser apresentado os principais pontos de atenção que devem ter.

Figura 17: Perda de super processamento x tecnologias da I4.0



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Quando se relaciona as tecnologias de base à perda de estoque, se pode utilizar sensores de movimento ou proximidade, dispositivos IOT ou RFID para coletar dados em tempo real sobre o nível de estoque, sendo ele estoque em processamento ou produto acabado. Esse monitoramento, permite que a empresa tome decisões rápidas ajustando a programação da produção ou pedidos de compras, evitando assim, o excesso de estoque. Além disso, o *Analytics* e a IA podem ser utilizadas para entender os padrões desses dados e gerar previsões de demandas com precisão. Com isso, a empresa consegue ter menor custo de estoque, produzindo ou comprando somente materiais necessários para atender a demanda. A simulação de cenários, pode evitar os estoques, já a integração vertical permite a integração de diferentes sistemas e fontes de dados, como sistemas de vendas, de produção e de logística. Isso permite uma visão mais completa do estoque e da demanda, o que ajuda a evitar o excesso de estoque. Por fim, a comunicação M2M suporta a necessidade de manter os processos estáveis para que se possa trabalhar com baixos volumes de estoque, neste sentido, os sensores e dispositivos dos equipamentos avisam se algum dado importante da máquina está anormal, gerando assim, a necessidade de um técnico da manutenção realizar uma inspeção antes que algo prejudique o funcionamento do equipamento e gere o aumento de estoque em processo.

Figura 18: Perda de estoque x tecnologias da I4.0



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Quando se trata da perda de espera, com as informações das tecnologias de base é possível evitar que o operador fique esperando por falta de MP, por exemplo. Assim como na perda de estoque, os sensores, dispositivos IOT ou RFID podem monitorar em tempo real o estoque e evitar que haja a perda de espera por conta de falta de MP no posto de trabalho. O sistema de visão que utiliza IA, também pode ser utilizado com o objetivo de emitir um aviso caso haja tendência de falta de MP no posto de trabalho. Além disso, simulações podem ser criadas para desenhar cenários que contenham as rotas, rotinas e ritmos de abastecimento e minimizar o risco de parada por falta de MP. A integração vertical possui um papel semelhante ao utilizado na perda de estoque, mas

desta vez com foco em não deixar que falte MP em processo, ao invés de pensar no excesso. O M2M com apoio da inteligência artificial, pode ser utilizado para prever falhas, sendo assim, o operador não precisa esperar para realizar manutenções preventivas. Dispositivos *wearables* podem ser utilizados para promover a cadeia de ajuda ou realizar a comunicação com outras áreas necessárias quando alguma anormalidade no posto de trabalho aconteça, com isso, minimizando a tempo de espera. Por fim, o uso de AGV/AMR pode minimizar os impactos relacionados a atrasos de entrega de MP, pois podem ser configurados para atender o abastecimento conforme a variação de demanda.

Figura 19: Perda de espera x tecnologias da I4.0



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

A última perda a ser conectada com as tecnologias da I4.0 é o intelectual, as tecnologias de base têm o mesmo propósito citado nas perdas anteriores. O grande volume de dados e informações geradas e analisadas servem para suportar a utilização das tecnologias de *front* pelo operador. Como tecnologia de *front* a simulação neste caso tem o objetivo de avaliar as condições de trabalho do operador, podendo por meio de uma simulação 3D, verificar questões ergonômicas e com isso, criar cenários de *layout* que atendam melhor as condições de trabalho. Os robôs colaborativos neste caso ficam com as tarefas repetitivas fazendo com que o operador tenha maior tempo para pensar e desenvolver novos processos e soluções. Os *wearables* podem ser utilizados para monitorar a saúde do operador, por exemplo, o relógio inteligente monitora os batimentos cardíacos do operador, temperatura corporal, oxigênio no sangue entre outros, sendo assim, mantendo a condição ideal de trabalho. A VR promove o desenvolvimento do operador por meio de treinamentos e situações de reflexão, além disso, pode ser utilizada como uma ferramenta que fornece condições do operador sugerir melhorias, desenvolver novas capacidades, entre outros. A AR neste contexto suporta o operador em situações que necessitam de auxílio, aumentando o seu poder de decisão e de resolução de problemas, com isso, atividades que antes não eram possíveis de serem executadas, por meio da AR o operador consegue realizar.

Figura 20: Perda intelectual x tecnologias da I4.0



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Após a última perda do lean ser relacionada com as tecnologias da I4.0 é possível fazer um resumo da construção inicial proposta pelo autor, com isso, todas as tecnologias relacionadas às perdas podem ser observadas na imagem:

Figura 21: Resumo perdas x tecnologias



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

4.3 ESTRUTURA CONCEITUAL – LEAN DIGITAL

Este capítulo descreve os elementos que compõe a estrutura conceitual para conectar as tecnologias da I4.0 com as perdas do Lean. A principal entrega da estrutura é ser uma ferramenta de apoio para que as empresas possam entender quais as tecnologias podem ser aplicadas para as perdas encontradas e os problemas que enfrentam no dia a dia. Para Deuse (2020), o desenvolvimento de um conjunto estruturado de métodos é a ilustração dos potenciais da I4.0 no contexto do Lean, bem como, o fornecimento de novos métodos para empresas. Os métodos são apresentados às empresas como abordagens gerais, invés de soluções técnicas específicas. Como resultado, empresas de outros setores podem adaptar os métodos. O primeiro passo no processo é avaliar o Lean e aprimorá-lo por meio de conexões com as tecnologias da I4.0, como parte desse processo, as empresas devem ser capazes de adaptar sua estratégia a partir dos resultados destas conexões.

Antes de analisar de fato as tecnologias, é importante que a empresa possua uma metodologia para desdobramento de sua estratégia. Para Dias e Tenera (2020), conhecer e compreender o setor que uma empresa atua hoje é insuficiente, também é preciso saber desenvolver novas atividades e prospectar negócios de forma metódica e sustentável. Deste ponto de vista, a estratégia se torna mais do que apenas um posicionamento e exercício analítico, também se torna um processo de descoberta à medida que se procura continuamente novos padrões de interação com clientes, negócios, tecnologia e mercado que exigem novos conjuntos de ferramentas auxiliares.

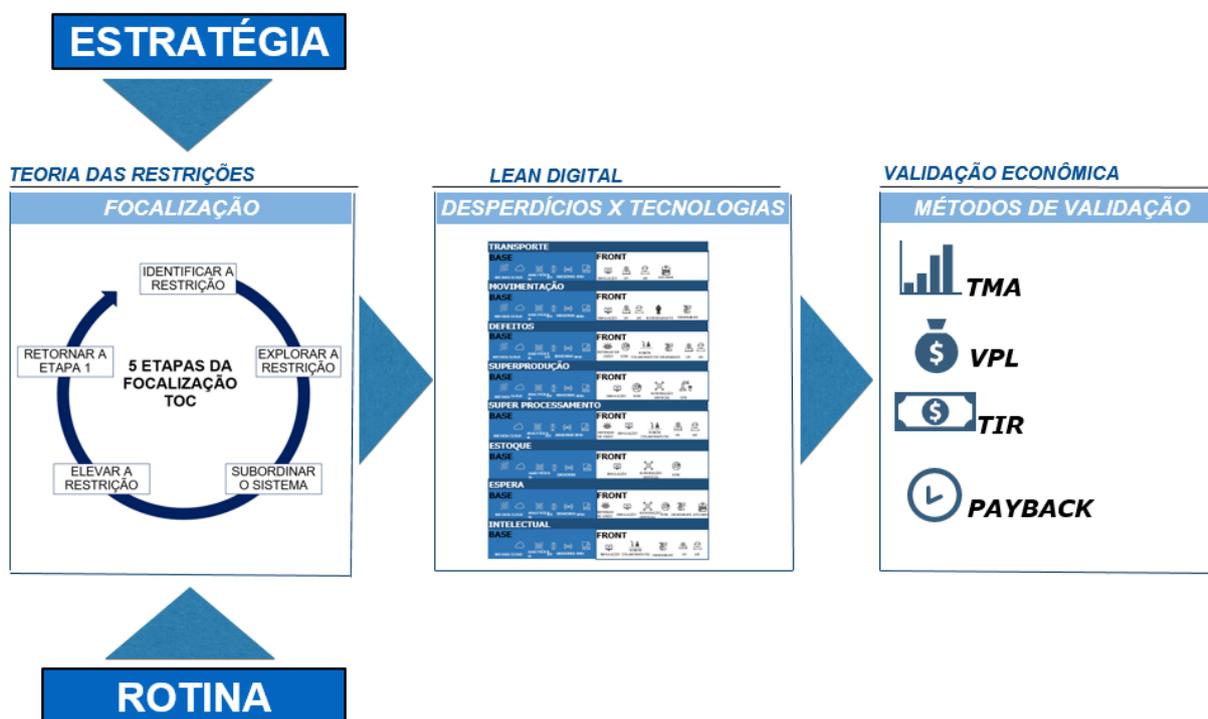
As características do Hoshin Kanri e do *Balanced Scorecard* (BSC) podem ser perfeitamente aplicadas no ciclo de planejamento estratégico da empresa. Enquanto o Hoshin Kanri auxilia no desdobramento anual e na execução das prioridades apontadas como estratégicas no BSC, o BSC assegura que a estratégia foi traduzida, testada e monitorada com foco no longo prazo (DIAS e TENERA, 2020). Para complementar a visão *top-down* da estratégia, a rotina é muito importante na coleta de informações relacionadas a processos e pessoas. Algumas informações importantes podem ser analisadas para tratar ações de curto, médio e longo prazo. Segundo Campos (1996), o gerenciamento da rotina do trabalho constitui a base do trabalho de uma organização e todo o crescimento da empresa é fruto do trabalho dessa gestão. Quando o gerenciamento da rotina do trabalho diário é bem compreendida e amplamente

praticado, faz com que o desdobramento da estratégia seja implementado de forma eficaz.

Um estudo da Deloitte (2020), afirma que pode ocorrer de um setor de uma empresa ou uma planta industrial adotar uma tecnologia diferente com base na necessidade urgente, o que leva a processos não padronizados, falta de compartilhamento de boas práticas, resultando em prazos mais longos para desenvolvimento e implantação. Após ter clareza no desdobramento de sua estratégia, passo muito importante para qualquer empresa, a estrutura considera uma etapa de entendimento de suas restrições. Esta etapa chamada de focalização por meio da TOC, possibilita entender onde estão as restrições do sistema que realmente impactam de forma sistêmica nos resultados e que, a partir de melhorias, podem trazer maior lucro. A integração de conceitos como Lean e TOC está sendo cada vez mais explorado e simultaneamente aplicado em várias indústrias (PIRASTEH, 2013). De modo geral as 5 etapas para desdobramento da focalização são: Identificar a restrição do sistema, decidir como explorar a restrição do sistema, subordinar todo o resto à decisão anterior, elevar a restrição e retornar ao primeiro passo.

Outra etapa muito importante da estrutura conceitual está relacionada à viabilidade econômica, visto que, como se trata de investimento em tecnologia, a empresa precisa ter clareza de quais serão as melhorias e o retorno que este investimento trará. A implementação da I4.0 envolve uma transformação significativa das competências e capacidades digitais de uma empresa. Como essa transformação é altamente complexa, geralmente levará vários anos, por isso, deve ser planejado e implementado de forma a garantir que impactos positivos na lucratividade ocorram em vários estágios ao longo da transformação (SCHUH *et al*, 2020). A figura 21 exemplifica as etapas citadas desta estrutura conceitual:

Figura 22: Estrutura conceitual



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

4.4 ETAPAS DE IMPLEMENTAÇÃO

4.4.1 Etapas da Focalização - TOC

A TOC permite que as empresas se concentrem nas restrições críticas e utilize as tecnologias da I4.0 para melhorar essas restrições. Em vez de simplesmente adotar tecnologias sem um propósito específico, a TOC ajuda a garantir que as tecnologias sejam usadas de maneira estratégica e eficaz e que o investimento em tecnologia seja aplicado onde realmente se obtém resultado no sistema como um todo. Como etapa 1 da focalização neste cenário de aplicação na estrutura conceitual, é importante analisar o processo gargalo do sistema, mas também avaliar outras restrições. A restrição pode ser interna ou externa, neste caso, é importante analisar também questões de mercado, como por exemplo, demanda atual x demanda de médio e longo prazo. Além disso, considerar o poder de investimento que a empresa possui, pois este, pode se tornar também uma restrição. A etapa 2 está diretamente ligada ao como explorar o sistema. Neste caso, entender quais são as maiores perdas encontrados na restrição e quais deles serão priorizados. Com isso, identificar as necessidades de monitoramento, definindo quais dados precisam ser coletados, como por exemplo: quantidade, localização, data de validade, temperatura, vibração, entre outros. A necessidade de tratamento e análise dos

dados identificando padrões e trabalhando com IA para prever soluções e por último entender qual tecnologia de *front* precisa ser implementada para trazer o maior benefício para a perda. A etapa 3 que diz respeito a subordinar todo o resto à decisão anterior, neste caso, dependendo da necessidade de cada tecnologia de base e de *front*, se pode citar mudanças de programação de fábrica, alterando a dinâmica de empurrada para puxada, controlar o fluxo a partir do gargalo, produzir para proteger o gargalo, etc...

A etapa 4 é elevar a restrição, nesta etapa se trabalha com as tecnologias de *front* que irão promover uma mudança no *status quo* do processo. As opções possíveis estão relacionadas a sistemas de visão, simulação, integração vertical, CPS, M2M, robôs colaborativos, *wearables*, exoesqueleto, VR, AR e AGV/AMR. Por fim, a etapa 5 de retornar a etapa 1, promove uma oportunidade de verificar se as mudanças realizadas estão sendo mantidas ou se o processo voltou ao estágio inicial.

4.4.2 Conexão entre as perdas e tecnologias

A conexão das perdas com as tecnologias da I4.0 promove um entendimento que as tecnologias precisam ser analisadas de uma forma mais ampla e estratégica. Com os desenvolvimentos atuais da I4.0, o Lean não se tornou obsoleto, no entanto, pode ser melhorado por tecnologias emergentes. Como resultado, é necessário avaliar as abordagens existentes para ver se elas combinam bem com a I4.0 e podem ser implementadas (DEUSE, 2020).

O formato proposto pela estrutura parte de uma premissa sutil, mas que tem uma diferença importante quando se pensa em sua aplicação prática. A estratégia de implementação de uma tecnologia sem uma análise prévia, pode resultar em estudos, esforço e expectativas que não são alcançadas. Por isso, nessa proposta, existe a premissa de analisar a restrição do sistema. Após isso, qual ou quais as perdas estão impactando no resultado do sistema. Com isso, quais tecnologias podem ajudar a eliminar ou reduzir esta perda.

Atualmente o surgimento de novas tecnologias no mercado tem aberto inúmeras possibilidades de aplicação nas empresas. Por um lado, gera grandes oportunidades de melhoria nos processos e conseqüentemente impactos positivos em segurança, qualidade e produtividade. Por outro, pode gerar uma confusão e dúvidas do que usar, quando usar e porque usar. A estrutura criada auxilia e busca deixar claro as oportunidades e opções de quais tecnologias se deve utilizar para cada situação. Como o

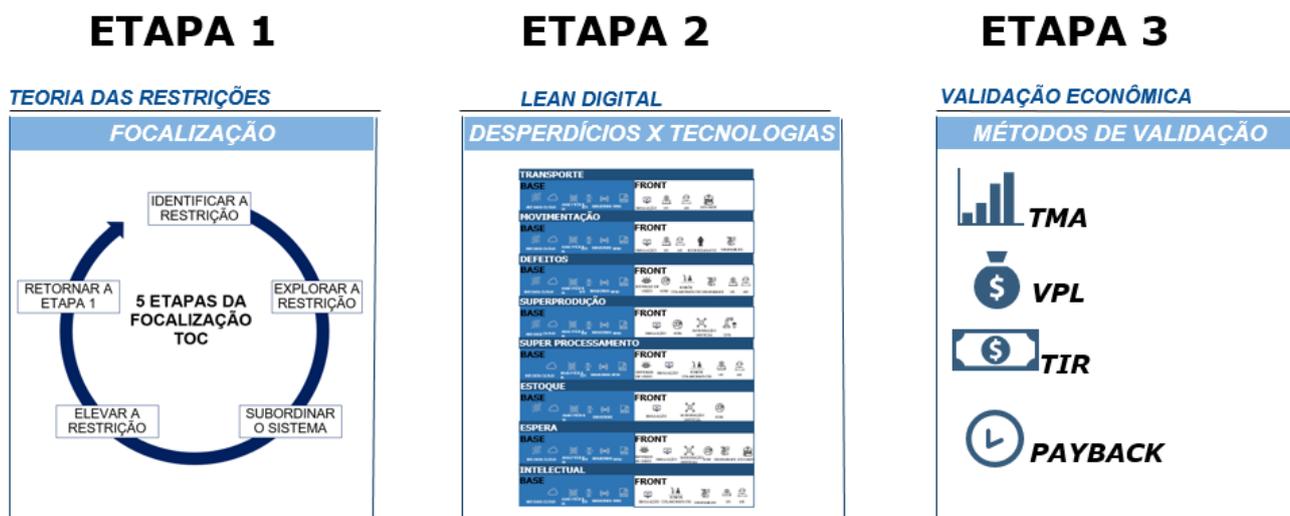
fluxo segue uma análise de identificação do gargalo, como explorar, subordinar e elevar, fica claro também, o porquê usar determinadas tecnologias propostas.

4.4.3 **Validação econômico-financeira**

A disponibilidade de uma nova tecnologia por si só não significa que seu uso possa ser eficaz, novas tecnologias estão surgindo ao longo dos últimos anos, mas nem sempre podem ser implementadas devido à falta de justificativa comercial, ou seja, que as empresas se beneficiem dela (SCHEER,2015). A última etapa é de extrema importância para fechar o ciclo da estrutura conceitual, visto que, com um mercado cada vez mais competitivo, com uma concorrência acirrada e com investimentos limitados, as empresas precisam ter confiabilidade nos investimentos que estão fazendo. Os benefícios das tecnologias precisam acompanhar os benefícios financeiros de sua implementação, por isso, as empresas precisam internamente realizar estes estudos de viabilidade utilizando métodos e conceitos que reflitam a realidade do seu mercado de atuação, como por exemplo, as taxas a serem utilizadas.

A estrutura traz genericamente alguns exemplos como TMA, TIR, VPL E PAYBACK, estes não são os únicos métodos existentes e cabe ressaltar que também não são excludentes, inclusive, podem e devem ser utilizados em conjunto para realizar uma análise ainda mais robusta. Com as etapas anteriores que formam a estrutura conceitual, se entende que, a tendência de aprovação nesta etapa pode ser maior pois, o foco está em melhorar a restrição do sistema e com isso o resultado pode se tornar perceptível em todos os níveis da empresa. A figura 22, demonstra as etapas que compõe a estrutura:

Figura 23: Etapas de implementação



Fonte: Autor

A estrutura conceitual proposta neste trabalho visa a fornecer uma perspectiva para a melhoria de processos utilizando as etapas de focalização da TOC, a conexão das perdas do Lean com o uso de tecnologias da I4.0 e a validação econômico financeira. A abordagem sistemática fornece uma base sólida para aumentar a eficácia operacional, aumentar a satisfação do cliente, reduzir custos e aumentar a competitividade das empresas. A utilização dessa estrutura possui um potencial significativo de contribuição para as empresas que a aplicarem, pois oferece um caminho claro para a melhoria dos processos, proporcionando assim, benefícios tangíveis e perenes.

5 VALIDAÇÃO DA ESTRUTURA CONCEITUAL

Este capítulo tem o objetivo de apresentar as considerações, bem como, a validação da estrutura conceitual proposta neste trabalho. Segundo Tortorella *et al* (2021), este método de validação está alinhado com estudos anteriores que também validaram estruturas conceituais do Lean com a I4.0 usando opiniões de especialistas. A primeira etapa consiste na escuta das gravações realizadas, afim de detalhar todos os comentários e opiniões do grupo focal, além disso, fazer a transcrição e análise das falas pelos participantes. Outra etapa importante é analisar todas as anotações realizadas durante as entrevistas, buscando contemplar todos os detalhes envolvidos.

5.1 ANÁLISE DO GRUPO FOCAL

Foram realizadas 3 entrevistas com duração total de 4 horas com profissionais da área que possuem conhecimentos em Lean, I4.0, TOC e validação econômico-financeira. Os agendamentos realizados se limitaram ao tempo máximo de 1,5h devido ao perfil e disponibilidade dos participantes do grupo focal. O processo de análise foi organizado em etapas para facilitar as contribuições dos participantes, o quadro 7 representa os assuntos e análises realizadas:

Quadro 7: Assuntos e análises realizadas

Assuntos	Análise realizada
Lean Digital	Contextualização geral
Lean	8 perdas
I4.0	Tecnologias de base e front
	Relação das tecnologias em cada perda
TOC	Aplicação na estrutura
Validação financeira	Aplicação na estrutura
Estrutura conceitual	Elementos
	Relevância
	Replicação

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

5.1.1 Análise do grupo focal: Introdução ao Lean Digital

O processo de análise teve início com a transcrição da gravação do primeiro encontro. Após a apresentação sobre a evolução da indústria e a evolução do Lean, a primeira pergunta teve uma característica ampla relacionada ao tema do Lean digital, com o objetivo de buscar maior reflexão sobre o conhecimento do grupo focal relacionado ao assunto. Em geral o grupo focal mostrou grande conhecimento, contextualizando a situação atual do Lean e a sua evolução, bem como, relacionando com a utilização das tecnologias da I4.0. Além disso, o grupo concordou que por conta da I4.0 ser o “assunto do momento”, assim como o Lean foi quando surgiu, muitas vezes as melhorias, estudos e as análises que são importantes e que poderiam ser implementadas sem grandes investimentos, acabam não sendo realizadas. Ou seja, há o risco de implementar tecnologias mantendo as perdas do processo. Outro ponto levantado pelo grupo focal e que pode contribuir para isso, é a facilidade ao longo dos últimos anos na aplicação das tecnologias. A seguir o participante 3 contextualizou conforme a sua percepção:

A velocidade que a gente consegue implementar as soluções digitais está muito mais rápida do que muitas vezes nós conseguimos implementar as soluções Lean, a velocidade da era digital junto as reduções nos custos das tecnologias, faz com que a gente acelere demais [...] em contrapartida, os processos que ainda não temos o Lean, acabamos implementando a tecnologia antes e esse é o erro que cometemos[...] entendo que a nossa visão como empresa olhando para a evolução das tecnologias é importante e necessária, porém precisamos dar um passo atrás em muitos casos.

O participante 5 concordou de forma geral com o participante 3, citando a evolução na agilidade em aplicar projetos de tecnologia, inclusive que também percebe a falta da aplicação do Lean antes da implementação da tecnologia em projetos dentro de sua empresa e no mercado em geral:

Percebo que a I4.0 vem sendo utilizada em muitos casos para vender projetos e com isso, acabamos deixando de lado etapas importantes que melhorariam o nosso processo antes de implementar a tecnologia[...] precisamos ter o cuidado para não implementar provas de conceito a todo momento sem ter a clareza da estratégia da empresa e dos seus objetivos.

Já o participante 6 enfatizou a importância do Lean na implementação das tecnologias da I4.0, pela sua experiência, a tecnologia deve ser sempre o meio e não o fim para a implementação. Além disso, cita o receio da perda da essência na resolução de problemas:

Eu iniciei implementando o Lean e hoje estou desenvolvendo projetos de I4.0, atualmente vejo muitas pessoas querendo inclusive inventar novas ferramentas para falar mais do mesmo, o Lean é importante porque ele nos mostrar onde estão as perdas e conseqüentemente as oportunidades[...] cito o exemplo do IROG, podemos ter dispositivos IOT que irão monitorar o equipamento possibilitando uma conectividade maior, porém o que eu faço com essa informação? A tecnologia pode ser aplicada para facilitar e melhorar a confiabilidade dos dados, sair do preenchimento manual, mas é necessário ter uma cultura de resolução de problemas / melhoria contínua para gerar impactos positivos[...] objetivo é reduzir custos, aumentar a produtividade e o lucro, por isso precisamos usar o Lean e a I4.0 em conjunto para potencializar ainda mais as oportunidades encontradas de forma sustentável.

5.1.2 Análise do grupo focal: 8 Perdas do Lean

Após a pergunta inicial para gerar as primeiras interações com o grupo focal, foi revisto os principais pontos relacionados ao Lean, o foco da apresentação foi relembrar o cenário em que o Lean surgiu e quais eram as necessidades da época. Além disso, foi apresentado ao grupo focal cada uma das 8 perdas, fazendo assim, o principal *link* com a necessidade da eliminação ou redução destas, visto que, um dos objetivos centrais do trabalho é realizar a conexão das perdas com as tecnologias da I4.0. Após essa apresentação, foi realizada então a segunda pergunta ao grupo focal, sendo considerada esta, a primeira pergunta de fato diretamente relacionada às etapas da estrutura conceitual proposta. O objetivo era validar as perdas do Lean consideradas no trabalho.

De forma geral o grupo focal concordou com as perdas consideradas na proposta por já serem amplamente conhecidas e aplicadas em muitas empresas que praticam o Lean. O participante 4 iniciou comentando a importância da análise das perdas e enfatizou a importância da inclusão da 8ª perda que relaciona a perda do intelecto seja por questões relacionadas a tempo, ideias, habilidades, perdas de melhorias e oportunidades de aprendizagem por não envolver ou ouvir as pessoas. No contexto atual, segundo ele, as atividades repetitivas ou manuais que não agregam valor na fábrica e também a quantidade de reporte de atividades precisam ser evitadas:

Uma frente que estamos iniciando é não automatizar o que não precisa ser feito, além disso, estamos pensando em como gerar as informações necessárias de forma semi ou totalmente automática. Precisamos evitar que as pessoas fiquem sobrecarregadas querendo absorver todas as demandas, sem contar o quanto estamos perdendo de competitividade por não aproveitar o tempo que temos para pensar em novas soluções.

O participante 6 trouxe uma contribuição sobre a inclusão de uma perda relacionada a não utilização de dados, ou seja, a baixa maturidade analítica/ evolução analítica. Essa visibilidade possibilita que os operadores ou o time envolvido melhorem

a interpretação de onde estão as oportunidades de melhoria. Além disso, utilizar realmente todas as informações geradas para tornar o seu processo mais eficaz. O participante 7 concordou com a questão abordada reforçando que atualmente essa grande quantidade de dados pode não estar sendo aproveitada como a empresa gostaria.

Os comentários dos participantes 6 e 7 foram analisados, mas não foram incluídos na estrutura conceitual. O entendimento é que não utilizar ou o baixo aproveitamento dos dados parte de uma necessidade de aumentar a maturidade em resolução de problemas ou estruturação destes. Além disso, pode estar relacionada ainda à 8ª perda que trata questões como habilidades das pessoas e que já consta na proposta. Como ponto de atenção, os comentários reforçam ainda mais a importância da capacitação e utilização das pessoas no amadurecimento do Lean Digital, visto que, há um aumento exponencial em informações importantes disponíveis para tomadas de ação. Os participantes 3 e 10 concordaram e reforçaram sobre a importância das perdas do Lean e o quanto, na sua visão, a 8ª perda será cada vez mais perceptível. Além disso, ressaltaram que, com as devidas adaptações as perdas se encaixam também em outras áreas, citando processos administrativos como compras, TI e engenharia.

5.1.3 Análise do grupo focal: I4.0, tecnologias de base e front

A partir desta validação, foi apresentado ao grupo focal os modelos que tem relação com a I4.0 e que foram considerados no trabalho. O principal objetivo da apresentação era explicar o que cada modelo considera em sua estrutura, quais os objetivos de cada um e principalmente fazer a relação com as tecnologias de base e *front* que seriam as próximas a serem validadas por eles. Todos os participantes do grupo focal entenderam a relação entre base e *front* e concordaram com a estrutura, porém foram sugeridas algumas mudanças ou considerações conforme a visão de cada participante. O participante 6 iniciou comentando que concordava com todas as tecnologias de base apresentadas na proposta, porém, sugeriu repensar se o RFID não estaria incluído na classificação já abordada com a nomenclatura “sensores”. Além disso, externou que sentiu falta da cibersegurança estar incluída nas tecnologias de base, segundo ele, neste novo cenário de compartilhamento de informações, essa tecnologia possui um grande nível de importância. Sobre as tecnologias de *front*, o participante 6 comentou que utiliza o modelo da Acatech no seu dia a dia e que com isso, ficou na dúvida quanto a inclusão de robôs colaborativos, exoesqueleto e VR, pois são recursos e não tem relação com dados, embora, entenda que são inseridos em outros modelos de

I4.0. Seguindo a sua explanação sobre as tecnologias de *front*, sugeriu modificar os robôs colaborativos para robôs adaptativos para fazer relação com o último estágio da Acatech. Comentou ainda que o sistema ciber-físico (CPS) no seu entendimento se trata de algo mais amplo que uma simples tecnologia, pois este conceito acaba conectando o mundo físico e digital. Por fim, trouxe um detalhe que precisava ser revisto em relação aos sensores, pois essa tecnologia deveria estar inserida em uma das tecnologias de *front*, sendo ela, a integração vertical e na estrutura proposta consta como tecnologia de base.

O participante 5 concordou com os principais pontos do participante 6, citando que a utilização de robôs colaborativos está limitando o potencial de uso de outros robôs, sendo assim, seria melhor utilizar o conceito de robôs adaptativos, possibilitando incluir até mesmo um robô industrial comum que, por meio de uma tecnologia pode se tornar adaptativo e até mesmo colaborativo. Em relação ao RFID mantém o mesmo posicionamento do participante 6 entendendo que poderia estar dentro da classificação de sensores e por fim, que também sentiu falta da cibersegurança. Além disso, sentiu falta na proposta do trabalho e trouxe uma contribuição relacionada ao processamento de dados na ponta:

Quando falamos de I4.0 temos vários níveis de processamento, desde o CLP da máquina até a *Cloud* [...] se não tivermos esse novo conceito de processamento não será possível extrair os dados via *Cloud* e entregar a grande quantidade de dados necessários para tornar o processo adaptativo, devido a velocidade necessária.

O participante 8 neste momento concordou com o participante 05 citando que o *edge computing* auxilia em situações quando a quantidade de dados coletados é muita grande (*Big Data*) e há uma dificuldade em processar e consumir todos esses dados. Segundo ele o *edge computing* traz um nível de processamento em um sensor ou dispositivo, sendo assim, diferente da *cloud*. A *cloud* é o processamento sendo realizado nela e existe o caminho inverso que é o *edge*, que serve para limitar ou controlar o volume de dados com o objetivo de transferir informações mais relevantes e não sobrecarregar a *cloud*. Essa tecnologia deveria estar na base.

Um exemplo que posso citar é o IOT, ele fica captando sinal a todo momento e normalmente se tem um serviço em *Cloud* que demanda um processamento e que fica capturando e compilando esses sinais. Quando falamos do *edge* o sensor IOT já tem um nível de processamento que ele já avalia e só informa o sistema quando tem uma informação relevante.

O participante 1 reforçou a opinião dos demais relacionando com as suas experiências em projetos. Comentou que em 2021 realizou a implementação de projetos

envolvendo RFID, e que poderia ser classificado como sensor sem a necessidade de estar separado. Em relação ao robô colaborativo também reforçou que o conceito utilizado que se encaixaria melhor seria o de robô adaptativo, pois nesta abordagem é possível fazer com que haja tomadas de decisões e assim, não tratar o robô somente como um recurso.

Após os comentários dos participantes do grupo focal em relação às tecnologias de base e *front*, as devidas análises foram realizadas e se chegou nas seguintes conclusões: Para o conceito do RFID, houve o entendimento de que os participantes buscaram ajudar na simplificação dos conceitos, porém, não foi considerada a alteração pelo fato de que RFID é classificado como uma tecnologia de identificação por radiofrequência. O RFID é uma tecnologia usada para rastrear bens, ativos e fluxos em um sistema logístico. É um termo usado para tecnologias que fazem uso de ondas de rádio para identificar automaticamente objetos (HU *et al* 2020). Então, apesar de compartilharem a capacidade de capturar dados em tempo real, o RFID e os sensores têm funções distintas, enquanto a principal função do RFID é a identificação de objetos, os sensores são utilizados para medir variáveis físicas, tais como temperatura, umidade e pressão.

Do ponto de vista da cibersegurança, a contribuição foi aceita, visto a importância que o assunto tem para suportar o avanço da implementação das tecnologias. Neste sentido Parker *et al* (2023) citam que, com a integração de componentes de computação, rede e processos físicos para otimizar a utilização de recursos de *hardware* e *software* e melhorar a eficiência dos processos, a cibersegurança se tornou fundamental para garantir um controle confiável desses processos. Em relação aos comentários do participante 6, as tecnologias de VR e exoesqueletos serão mantidas pois tem uma relação direta com assuntos importantes que serão tratados nas perdas. Além disso, no caso da VR está diretamente associado ao *Smart Working* do modelo dos 4 *Smarts* de Frank *et al* (2019), ou seja, a estrutura não está considerando somente a visão da Acatech para construir a sua aplicabilidade.

Sobre o CPS o comentário do participante 6 foi pertinente e haverá mudança na estrutura conceitual. Para Carvalho *et al*, (2018) o CPS é integração entre os mundos físico e digital por meio da integração de redes, computação e armazenamento, possibilitando um ambiente industrial interativo com a criação de produtos e processos inteligentes (fábricas inteligentes) capazes de transformar as cadeias de valor, formando

assim o CPS. Sendo assim, a representatividade do conceito na estrutura irá ser alterada. Por fim, a consideração para que os sensores estivessem na tecnologia de *front* junto à integração vertical não foi considerada, embora conceitualmente faça sentido. Nesta estrutura proposta, o principal objetivo é conectar as tecnologias da I4.0 e não implementar o conceito de I4.0 por completo, como é o objetivo da integração vertical. Por isso, será mantido nas tecnologias de base pela importância na geração de dados.

Referente aos robôs colaborativos, se levou em consideração os comentários dos participantes e o nome será alterado para robôs autônomos. O objetivo é deixar o nome mais abrangente para as oportunidades de aplicação. Com isso, dentro desta tecnologia, serão incluídos também o AGV e o AMR. Sobre o *edge computing*, como se trata de uma tecnologia complementar ao *Cloud computing* e pela sua importância, será incluída nas tecnologias de base. Segundo Saif e Wazir (2018), por meio dela, as empresas têm a capacidade de selecionar quais dados devem ser armazenados localmente ou enviados para a *Cloud*. Esse processo de seleção de dados pode resultar em uma redução da quantidade de informações trafegadas pela rede, reduzindo a necessidade de largura de banda e tempo de processamento, resultando em economia de recursos de computação e tempo para a empresa. Tanto a *Cloud* quanto a *Edge computing* oferecem inúmeros benefícios para empresas que enfrentarão um grande fluxo de dados nos próximos anos. No entanto, somente uma tecnologia pode não atender às necessidades de todas as empresas, especialmente à medida que avançamos em direção a um futuro onde os dados se tornarão a essência dos negócios. Conforme mais empresas percebem o valor dos grandes conjuntos de dados e o poder da análise, haverá uma demanda crescente por soluções de processamento de dados. Sendo assim, as empresas podem permanecer um passo à frente da concorrência ao utilizar as capacidades tecnológicas de ponta oferecidas tanto pela *Cloud* quanto pela *Edge computing* (SRIRAM, 2022).

5.1.4 Análise do grupo focal: I4.0, relação das tecnologias em cada perda

Após o fechamento com o grupo focal na validação das tecnologias de base e *front*, foi lembrado a validação anterior relacionada às perdas do Lean. Além disso, foi contextualizado que o próximo passo seria utilizar as validações para detalhar cada perda, relacionando as tecnologias que possuem impacto direto na redução ou eliminação. A primeira perda apresentada ao grupo focal foi a de transporte, no momento da apresentação foi detalhado a importância das tecnologias de base para essa

perda e os impactos das tecnologias de *front*. O participante 6 começou as suas considerações abordando a tecnologia M2M e sugerindo a sua inclusão:

Eu vejo no M2M uma tecnologia que pode melhorar muito a agilidade na comunicação dos equipamentos. Com isso, o AGV ou AMR podem estar sempre abastecendo máquinas que realmente precisam de sua utilização, tornando o sistema flexível e eficiente, outro ponto, é a possibilidade de planejar melhor as rotas e rotinas deles.

O participante 3 concordou e citou outra tecnologia que ele vem utilizando para mapear e melhorar as rotas de seus modais logísticos. Segundo ele, com a utilização da tecnologia GPS, é possível observar rotas inequívocas e a partir disso, montar times de projetos para reduzir ou eliminar essa perda. Na sequência deste comentário o participante 4 contribuiu afirmando que o GPS é uma tecnologia da I4.0, inclusive citando a GARTNER e complementando que se trata de uma tecnologia com maior domínio de implementação atualmente:

Acredito que seja interessante incluir o GPS na estrutura do trabalho pela visibilidade dos dados que ele proporciona. Às vezes esquecemos de algumas tecnologias conhecidas a mais tempo, mas sim, o GPS é uma tecnologia da I4.0 sendo citada inclusive pela GARTNER (PARTICIPANTE 4).

Os comentários dos participantes foram pertinentes e as tecnologias sugeridas serão incluídas, reforçando o conceito e aplicação do M2M. O autor Chakravarthi (2021), afirma que a tecnologia M2M possibilita detecção, medição, controle e gerenciamento de matéria-prima e recursos de comunicação, o que pode facilitar a eliminação ou redução da perda de transporte. Sobre o GPS, as pesquisas estão sendo cada vez mais aplicadas na coleta de dados. Para obter dados mais precisos, uma série de métodos de processamento de dados de GPS foram desenvolvidos durante a última década (SHEN e STOPHER, 2014).

Os demais participantes concordaram de forma geral com as tecnologias apresentadas e com os comentários dos participantes, com isso, foi finalizado a validação da perda referente a transporte. A próxima perda e as tecnologias relacionadas apresentadas ao grupo focal foi a de movimentação. O participante 4 iniciou suas considerações comentando sobre um projeto recente que tinha objetivo de reduzir os riscos de segurança, este projeto analisava as movimentações das empilhadeiras e pessoas de uma área específica. A utilização de um sistema de visão que continha IA conseguiu ajudar na redução dos riscos de acidentes.

Ainda neste sentido, o participante comentou que existe um projeto mapeado para melhorar a eficiência de uma determinada área da empresa onde se tem muita

operação manual e conseqüentemente muita movimentação. Com câmeras bem posicionadas e com o novo algoritmo de visão chamado de yolo v8, é possível capturar as movimentações e gerar informações de eficiência dessa área. Entretanto, é importante citar que há uma certa restrição ainda quanto a esse tipo de tecnologia por utilizar imagem dos operadores, precisando ser negociado com o sindicato, por exemplo.

O participante 7 sugeriu a utilização de um robô colaborativo. Segundo ele, quando se trata de robô colaborativo, se pode pensar na sua utilização junto ao operador, realizando atividades, como por exemplo, pegar a peça de um local que está mais afastado do posto de trabalho e alcançar essa peça próxima ao operador. Essa tecnologia pode ser utilizada em vários tipos de *layout* e contribuir nessa perda.

Os participantes 8 e 9 concordaram com as tecnologias utilizadas e reforçaram a utilização da simulação para projetar e prever movimentações desnecessárias antes das alterações físicas de um *layout*. Segundo eles, por meio da simulação é possível verificar a ineficiência nas movimentações dos operadores e realizar estudos considerando novas possibilidades de alocar os equipamentos. Em alguns casos inclusive, alterando o conceito ou formato do *layout*. O participante 8 adicionou ao seu comentário, os ganhos que teve em um projeto utilizando a simulação. Após as análises de *layout* e processos de um novo produto, foi possível aumentar em quase 20% a produtividade dos operadores em relação à primeira proposta, evitando muitas movimentações que seriam necessárias. Além das mudanças no conceito do *layout*, também impactamos no tipo de equipamento que seria realizado o investimento.

O participante 10 trouxe um questionamento em relação a utilização do exoesqueleto para evitar ou reduzir a perda. No seu entendimento o exoesqueleto está relacionado a melhorar a qualidade de um posto de trabalho onde as condições ergonômicas não são as ideais:

Fiquei refletindo sobre o verdadeiro impacto do exoesqueleto na redução ou eliminação da perda de movimentação dos operadores, acredito que o exoesqueleto por si só não tenha esse objetivo, ele está muito mais relacionado a melhorar condições ergonômicas ou até mesmo reduzir a carga nos movimentos.

Após as sugestões dos participantes, o sistema de visão será incluído como tecnologia de *front*. Segundo Röper (2019), esta tecnologia vem crescendo e se desenvolvendo proporcionando tarefas de reconhecimento, detecção, movimento, restauração de imagens, bem como, de identificação, sendo estas realizadas por meio de máquinas de maneira automática. Para a utilização do robô colaborativo, a inclusão

nesta perda de movimentação também pode ter impacto positivo, com isso, será incluído, lembrando que com a alteração do nome para robôs autônomos, como já citado anteriormente. Reforçando esta importância, é lembrado a contribuição neste trabalho de Matheson *et al* (2019), citando que, uma nova fronteira para a robótica é a colaboração humano-robô e essa sinergia será importante na indústria para melhorar as linhas de produção em termos de desempenho e flexibilidade. Isso só pode ser alcançado com sistemas que são fundamentalmente seguros para operadores humanos, simples de usar e fáceis de configurar. Por fim, a tecnologia do exoesqueleto será retirada conforme sugestão dos participantes. Realmente ela tem um impacto nas questões ergonômicas e de segurança, inclusive, foi com este viés que foi descrita a sua participação neste trabalho. Porém, ela não tem impacto direto que faça com que a perda de movimentação seja minimizada ou até mesmo eliminada.

De forma geral os demais participantes concordaram com as tecnologias apresentadas e com as considerações realizadas anteriormente. Citaram que *Wearables*, VR e AR também tem um papel importante quando são utilizados em treinamentos e como suporte para atividades que possuem muitas etapas. Sendo assim, a próxima perda apresentada ao grupo focal foi o defeito. O participante 8 e 9 iniciaram concordando com as tecnologias apresentadas, porém sugeriram a inclusão de simulação. Para o participante 8 o *process human* possibilita criar instruções de trabalhos dinâmicas nas etapas do processo. Junto a isso, comentou sobre a experiência que tiveram junto aos operadores:

Disponibilizamos os vídeos da simulação para os operadores em seus postos de trabalho e tivemos um *feedback* muito positivo. Essa tecnologia pode auxiliar no treinamento dos operadores afim de evitar defeitos (participante 8).

O participante 9 comentou que existe uma demanda de um processo novo que foi solicitado instruções de trabalhos virtuais que irão ser geradas por meio de simulação para que possam ser realizadas as primeiras análises dos processos, mesmo que, em ambiente virtual. Na sequência o participante 10 também comentou sobre a utilização de sensores de *motion capture* utilizados em situações que exigem a análise de micro movimentos, compartilhando também a sua experiência com a tecnologia.

Tive a oportunidade de realizar um teste em uma empresa calçadista que trabalhei e os resultados foram muito satisfatórios, conseguimos por exemplo, realizar análises ergonômicas e cronoanálises das atividades com maior riqueza de detalhes, inclusive garantindo a confiabilidade nos dados[...]

Além disso, contribuiu afirmando que o exoesqueleto tem impacto na perda de defeito, pois existem diversas operações que ao longo do dia o operador pode perder a eficácia por uma questão de fadiga e cansaço. O exoesqueleto pode garantir que defeitos não sejam produzidos por esta condição. O participante 4 reforçou a importância das tecnologias de base, principalmente citando o *analytics* e IA.

Quando se fala nos pilares 5 e 6 da Acatech da I4.0 existe um enfoque em *analytics* e IA. Aqui na empresa nós estamos trabalhando em soluções que consigam nos ajudar a prever o defeito antes que ele aconteça, então com IA é possível entender se algum parâmetro mapeado está fora de seu padrão e com isso alterar os parâmetros necessários para manter a qualidade do produto. Com isso, começamos a trabalhar com instruções de trabalhos dinâmicas que podem alterar conforme as condições de processo. Reforço que a IA é uma aliada muito importante nesta perda[...]

Além disso, destacou um projeto do qual fez a utilização de AR onde foi apresentado informações em tempo real para o operador. Com as etapas do processo sendo demonstradas em tempo real, foi possível verificar e avisar o operador quando havia alguma atividade incorreta. Junto a isso, se tem a oportunidade de melhorar a condição do operador em atividades críticas que necessitam de muitas etapas.

Após os comentários do participante 4, os demais concordaram com as colocações anteriores e com as tecnologias propostas sem maiores objeções. Sobre a sugestão dos participantes em incluir a simulação, após os exemplos apresentados, há o entendimento que faz sentido e será realizado. As contribuições reforçam o conceito de I4.0 onde se pode gerar uma interação entre a realidade virtual e física. O exoesqueleto também será incluído nesta perda. Em relação ao *motion capture*, ficou definido que se encaixa na classificação existentes nas tecnologias de base denominada sensores. A próxima perda a ser tratada foi a de superprodução, o participante 6 iniciou concordando com as tecnologias apresentadas e sugerindo a inclusão de sistemas de visão:

Na minha opinião o sistema de visão pode ser incluído na perda apresentada, pois ele pode estar conectado à máquina e por meio de uma aprendizagem detectar se os níveis de estoque estão acima do permitido, caracterizando a superprodução, fazendo com que haja um aviso para parada de máquina por exemplo.

O participante 5 ressaltou sobre a importância da utilização da simulação em novas propostas de *layout* ou em novos processos e considerou importante a inclusão do *Advanced planning and scheduling* (APS) em situações do dia a dia para garantir o melhor sequenciamento e evitar a superprodução. Ao final o participante 1 lembrou a questão comentada sobre o CPS, onde foi citado que se trata de algo maior do que

simplesmente uma tecnologia e que, seria preciso retirar das tecnologias de *front* e representar de outra forma. Conforme já citado, essa alteração será realizada.

Pelos comentários já realizados pelos participantes nas outras perdas, a sugestão sobre o sistema de visão será aceita e será incluída nesta perda. Embora a sugestão do APS tenha sido de incluir dentro da tecnologia de simulação, a decisão foi de considerar ele como uma tecnologia de *front*, com isso, é possível deixar mais claro quando há o impacto na perda e os benefícios. Pela relevância de sua aplicação e seus benefícios, também será incluído.

Segundo Giacon e Mesquita (2011), os sistemas APS tem a função complementar aos ERP's e são capazes de simular vários planos e programações com diversas restrições. Eles permitem a geração de planos otimizados e resolvem problemas complexos de planejamento usando métodos heurísticos, programação linear e outros. Esses sistemas também possuem alta velocidade de processamento, mas requerem um *hardware* dedicado. Um dos principais objetivos dos sistemas APS é determinar com precisão o programa de produção, levando em consideração as principais restrições relacionadas à disponibilidade de materiais e máquinas. Os sistemas APS levam em conta as restrições de matéria-prima, planejam a entrega somente quando necessário e usam pesquisa operacional para agendar a produção, minimizando o custo de *setup*, cumprindo prazos de entrega, reduzindo o trabalho em processo e outras restrições.

Os demais participantes concordaram com a proposta inicial e com as contribuições dos demais, com isso, foi apresentado a perda de super processamento. Nesta perda o participante 3 concordou com a proposta apresentada, entendendo que há uma tendência maior das tecnologias ajudarem em cenários com operações manuais, pois máquinas normalmente tem etapas bem definidas. O participante 7 entendeu que as tecnologias podem ajudar a evitar o super processamento garantindo que sejam seguidas as atividades planejadas. A utilização de robôs também podem ser soluções para atividades com alto grau de complexidade. O participante 1 reforçou as oportunidades com as tecnologias consideradas na proposta citando que as simulações podem ajudar a evitar etapas ou operações desnecessárias. A AR pode ser utilizada para garantir que o operador execute somente as etapas do processo que realmente são necessárias e a VR potencializar o treinamento do operador para que ele aprimore o que precisa ser feito no seu dia a dia.

Os demais participantes teceram comentários com o mesmo objetivo e com isso, foi apresentado a próxima perda relacionada a estoque. O participante 6 iniciou com as suas contribuições relembrando a oportunidade da utilização do sistema de visão que pode controlar e avisar caso haja níveis de estoque acima do permitido/ideal. Já o participante 9 comentou que o AGV/AMR pode garantir que não haja estoque por falta de transbordo na linha. O participante 5 lembrou a utilização do APS na perda de superprodução e sugeriu sua inclusão nesta perda também:

Vejo nesta perda e a tecnologia relacionada a ela, semelhanças à superprodução, ou seja, poderíamos utilizar o sistema de visão para avisar caso os níveis de estoque não estejam conforme o padrão e por meio do M2M a comunicação para o equipamento anterior pare de produzir (participante 6).

O AGV/AMR pode evitar com a sua flexibilidade que o estoque fique acumulado em alguma operação por falta de comunicação ou até mesmo por esquecimento, por isso, eu incluiria nesta perda (participante 9).

Assim como na superprodução, sugiro a inclusão do APS na perda de estoque. Vejo que ele pode ter uma forte contribuição para tentar minimizar os estoques, já que ele ajuda a otimizar a programação, conseguindo maximizar a eficiência da produção e minimizar a perda (participante 5).

As sugestões dos participantes foram aceitas, visto que, com as inclusões há oportunidade de buscar a eliminação da perda. Com isso, serão incluídas as tecnologias de sistema de visão, AGV/AMR e APS. Para a perda de espera os participantes teceram comentários sobre os benefícios das tecnologias escolhidas. O participante 5 sugeriu novamente o APS comentando que uma programação eficiente contribui para que possam ser minimizadas as questões de espera nos processos e evitar atrasos desnecessários.

O participante 6 citou que todas as tecnologias faziam sentido e que gostaria de ressaltar a importância dos wearables na perda, pois acaba ajudando na cadeia de ajuda. O participante 10 destacou a importância do AGV/AMR comentando que na sua situação atual, ele possui a perda por espera devido aos modais logísticos atuais (empilhadeiras) não abastecerem ou recolherem o material no momento correto. Por fim, o participante 8 concordou com os demais e adicionou um comentário sobre a contribuição positiva que a simulação pode fornecer para minimizar ou eliminar a perda de espera.

A sugestão de inclusão do APS foi analisada para esta perda e por todo o potencial que ela tem também será incluída. Para a 8ª perda do trabalho, a intelectual, os participantes não incluíram tecnologias além da proposta apresentada, os comentários reforçaram as tecnologias escolhidas e seus benefícios. O participante 9 ressaltou que

principalmente em postos de trabalhos críticos é necessário utilizar a tecnologia na substituição das pessoas. Para o participante 7, o avanço da tecnologia pode aperfeiçoar os treinamentos dos operadores e além disso, criar condições diferentes para que as pessoas possam contribuir cada vez mais no desenho e construção de novas propostas de trabalho. O participante 1 concluiu comentando que os *wearables* tem um papel importante, visto que, podem monitorar questões de saúde dos operadores.

Após estes comentários, a etapa de validação da conexão das perdas do Lean com as tecnologias da I4.0 foi finalizada, sendo necessária a validação das outras etapas da estrutura conceitual pelos participantes. Como a primeira etapa da estrutura conceitual trata da TOC com suas etapas de focalização, foi apresentado ao grupo a parte conceitual sobre o tema e a sua importância. Após a explicação foi aberta aos participantes a pergunta sobre a importância da TOC na estrutura e se eles concordavam com essa etapa inicial. Todos os participantes do grupo focal concordaram com esta etapa no trabalho e os principais comentários seguem na sequência.

O participante 5 iniciou seus comentários concordando com as etapas de focalização da TOC. “Faz muito sentido, muitas vezes aplicamos projetos onde o resultado global acaba não aparecendo”. Além disso, o participante comentou que participou de projetos com grandes investimentos em áreas da empresa que não eram gargalos e que ao final os projetos conseguiram apresentar melhorias, porém, o fluxo ficou pior. O participante 10 corroborou com as afirmações do participante 5, comentando que “a proposta da TOC no trabalho está bem clara e faz muito sentido” e finalizou comentando que utilizando o Lean Digital no gargalo, os resultados irão aparecer de forma exponencial, criando um ambiente onde haverá a necessidade e a expectativa de expandir os ganhos. O participante 7 refletiu sobre a etapa e citou que “gostaríamos de poder implementar tudo que conhecemos em todos os processos, porém, sabemos que na prática é muito difícil”. Após isso, trouxe uma contribuição em relação às tecnologias, comentando que é preciso refletir se as provas de conceitos (POC’s) realmente serão testadas no gargalo, devido a sua criticidade para todo o fluxo. Finalizou então, sugerindo que as aplicações sejam realizadas em processos com características semelhantes, para que assim, possa se obter as informações e melhorias desejadas para aplicar no gargalo.

Neste sentido o participante 1 também trouxe a sua percepção sobre as diferenças na prática que o Lean Digital pode oferecer:

Esse é um ponto importante, visto que a proposta do trabalho aborda uma proposta diferente do Lean tradicional, onde agora teremos a implementação de tecnologia. Se deve ter o cuidado de adaptar os conceitos para que façam sentido nesta nova abordagem (participante 1).

O participante 3 ressaltou a importância dos conceitos da TOC e suas etapas de focalização e sugeriu que a abordagem do trabalho fosse guiada pela TOC. Com isso, seria possível entender melhor a conexão dos assuntos e representar melhor o que o trabalho está se propondo. Por fim, ainda explicou que alterando o formato visual da proposta, seria mais fácil para que fosse posteriormente aplicado e validado na prática por alguma empresa.

Com os comentários acima, a primeira parte da estrutura conceitual relacionada a TOC e suas etapas de focalização foi validada com o grupo focal e os comentários relacionados a melhoria no visual foi considerada. O próximo passo foi inserir ao grupo a importância e os conceitos da última etapa relacionada a validação econômico-financeira. Com isso, após a apresentação, foi solicitado que comentassem como eles analisavam essa etapa dentro da estrutura e se fazia sentido. De forma geral, assim como na TOC e suas etapas de focalização, todos os participantes do grupo focal concordaram com essa etapa e sua importância e os principais comentários estão na sequência.

O participante 7 destacou que “o objetivo da empresa sempre será ter lucro”. Então para ele, essa etapa é muito importante e necessária para fechar o ciclo da estrutura conceitual proposta no trabalho. O participante 6 expressou que para a aplicação de tecnologias é necessário investimento também em infraestrutura que precisam ser calculados e confrontados com os ganhos dos projetos. O participante 10 concordou com os participantes 6 e 7 e citou:

Essa etapa vem como a cereja do bolo da tua estrutura conceitual, no dia a dia precisamos apresentar os ganhos para realmente partirmos para um *Rollout* de projeto (participante 10).

O participante 2 analisou que é um assunto importante para dar subsídio para que os projetos realmente sejam implementados após a POC. Destacou ainda que “ mais que importante, é necessária essa etapa de validação econômico-financeira, pois até então o teu trabalho apresentou o que será feito e esta etapa na minha opinião mostra como poderá ser implementado e replicado gerando retorno”. Por fim relatou que na empresa onde atua usam como ponto de partida o *payback*, mas também validam utilizando VPL, TIR e TMA.

Com a etapa concluída junto ao grupo focal sobre a validação econômico-financeira, todos os elementos da estrutura conceitual foram apresentados. Ainda assim,

se faz necessário analisar a estrutura como um todo e analisar a conexão dos seus elementos para garantir que individualmente e estruturalmente os assuntos tem representatividade na implementação do Lean Digital. Neste sentido, o grupo focal foi questionado com a seguinte pergunta: Como vocês analisam a estrutura proposta? Os elementos contidos contribuem para a aplicação do Lean Digital?

O participante 3 comentou que todos os elementos apresentados são importantes e tem uma conexão, porém explicou “o que sinto falta é de uma relação direta dos elementos, por exemplo, como e quais etapas da TOC encaixam com o Lean Digital”. Após isso, comentou ainda que tem dificuldade em entender onde de fato entra a validação econômico-financeira no fluxo. Com isso, finalizou solicitando que deixasse mais claro para facilitar a interpretação. O participante 1 afirmou que os assuntos se complementam muito bem. Nesse mesmo sentido, destacou que “consigo enxergar uma ordem lógica na estrutura conceitual proposta”. Por fim, concordou com o participante 3 e destacou que se as etapas ficassem mais claras e detalhadas, seria mais fácil a interpretação do trabalho. O participante 10 emitiu um comentário sobre a parte da estratégia que é citada como importante no trabalho.

Embora não tenha maior aprofundamento, entre os elementos da tua estrutura consta a parte da estratégia e percebo que deixamos muitas oportunidades de lado por não realizar essa conexão, com isso, também sugiro que verifique como a tua estrutura proposta poderia se conectar melhor com a estratégia, de resto concordo com o que foi apresentado (participante 10).

Os demais participantes concordaram com os comentários e fizeram algumas contribuições no mesmo sentido que os descritos acima. Conforme citado anteriormente, os comentários foram levados em consideração para a melhoria visual da estrutura. Outra etapa importante na validação da estrutura conceitual é entender o quão relevante ela é, ou seja, se com a conexão dos assuntos na estrutura se pode utilizá-la na prática como “plano de fundo” e se ela pode ser utilizada em outros segmentos. Portanto, não possui características que limitam demais a sua utilização. Com esse foco, o grupo focal trouxe as suas contribuições para as últimas validações.

O participante 5 destacou que “a estrutura é muito relevante por tudo que já conversamos sobre ela, sobre as conexões que os assuntos têm e sobre a importância de muitas vezes não fazermos as análises ideais”. Destacou ainda que muitas vezes o foco é em algum processo que não agrega valor para o fluxo e sim para o ótimo local. Finalizou expressando sua satisfação com a estrutura proposta e afirmando que ela é adaptável para aplicação em outras empresas. O participante 10 concordou com o

participante 5 sobre a relevância da estrutura e sobre ser adaptável e geral o suficiente para aplicação em outras empresas. “Vejo que ela se encaixa muito bem no setor secundário independente do segmento, em alguns casos no primário e vejo menor aderência no setor terciário, pois precisa de maiores ajustes para implementar em empresas de serviço, por exemplo. Neste sentido, vejo que existem conceitos para as perdas de Lean Office e suas tecnologias que encaixam melhor”.

O participante 1 concordou com os demais participantes nas questões de relevância e replicação e ressaltou que “ a estrutura é realmente relevante”. O participante 4 explorou o contexto de a estrutura ser robusta na sua construção, “o que torna relevante a sua utilização”. Os participantes 6 e 8 valorizam a relevância para o dia a dia e que pode ajudar muitas empresas que estão iniciando a sua jornada ou até mesmo que já tenham uma maturidade. Como resultado do trabalho até aqui, foi possível coletar informações importantes dos participantes do grupo focal sobre a estrutura conceitual, o que permitirá aprimorá-la. No próximo capítulo, será revisada a estrutura conceitual com base nos comentários realizados. Esta revisão ajudará a garantir que a estrutura seja adequada ao que se propõe e para que possa ser efetivamente aplicada.

5.2 SÍNTESE DO GRUPO FOCAL

O objetivo desta seção é organizar e resumir as considerações e mudanças feitas com base no grupo focal. O quadro 8 apresenta o resumo de todas as etapas que foram apresentadas e validadas. As 8 perdas propostas inicialmente no trabalho não tiveram inclusões ou alterações sugeridas pelos participantes. As tecnologias de base e *front* tiveram inclusões, alterações e exclusões. Para as tecnologias de base foram inclusas a ciber segurança e a *edge computing*, duas tecnologias relevantes para a construção do Lean Digital, com isso, houve alteração no nome de uma tecnologia de base, passando de *Cloud* para *Cloud/Edge computing*. Já as tecnologias de *front* tiveram a inclusão do GPS e algumas alterações de nome e demonstração. O CPS, continuará na estrutura, mas será demonstrado de uma forma diferente, buscando abranger a relação entre o sistema físico e virtual. Outra alteração é a mudança no nome dos robôs colaborativos para robôs/veículos autônomos, assim é possível considerar diferentes aplicações e estágios de maturidade. Com essa alteração, o AGV/AMR passam a ser considerados nesta nova classificação.

Quadro 8 Síntese do grupo focal

Assuntos	Análise realizada	Definição final
Lean	8 perdas	Não houve alteração/inclusão
I4.0	Tecnologias de base	Inclusão de Ciber Segurança Inclusão de <i>Edge computing</i> e alterado nome para <i>Cloud/Edge computing</i>
	Tecnologias de front	Sistemas Ciber físicos - alterado a demonstração Robôs colaborativos - alterado nome para Robôs/veículos autônomos AGV/AMR - Inclusos na nova classificação (Robôs/veículos autônomos) Inclusão GPS
Perdas x tecnologias I4.0	Transporte x tecnologias	Inclusão M2M e GPS
	Movimentação x tecnologias	Inclusão Sistema de visão, Robôs autônomos. Retirado o exoesqueleto
	Defeitos x tecnologias	Inclusão da simulação e exoesqueleto
	Superprodução x tecnologias	Inclusão do sistema de visão, APS
	Super processamento x tecnologias	Não houve alteração/inclusão
	Estoque x tecnologias	Inclusão de sistemas de visão, robôs autônomos e APS
	Espera x tecnologias	Inclusão do APS
TOC	Intelectual x tecnologias	Não houve alteração/inclusão
	Aplicação na estrutura	TOC como um guia do restante do trabalho
Validação financeira	Aplicação na estrutura	Separar as validações por classificação
Estrutura conceitual	Relação entre os elementos	Melhorar/Alterar a conexão entre os elementos
	Relevância de utilização	Alta relevância
	Possibilidade de replicação	Alta possibilidade

Fonte – Elaborado pelo autor (2023)

A análise realizada entre as perdas e tecnologias da I4.0 ficou ainda mais robusta após a validação com o grupo focal, com isso, algumas sugestões importantes foram consideradas e incluídas na estrutura. Na perda de transporte foram incluídas as tecnologias M2M e GPS. Na perda de movimentação houve a inclusão de sistemas de visão e robôs autônomos, sendo que, ainda foi excluída a tecnologia do exoesqueleto, por não ter impacto direto nesta perda. Na perda de defeitos foi incluída a simulação, com um fator bem importante de conectar o ambiente virtual com o ambiente físico na validação de propostas que ainda não foram executadas, além disso, o exoesqueleto

também foi incluído com o objetivo de auxiliar em atividades que podem gerar defeito ao longo da jornada de trabalho, devido principalmente, a questões ergonômicas. Já na superprodução foi incluída os sistemas de visão e APS. Por fim, na perda de estoque foi incluída sistemas de visão, robôs autônomos e APS. Para as perdas de super processamento e intelectual o grupo focal concordou e reforçou as tecnologias apresentadas sem maiores inclusões ou alterações.

As demais etapas da estrutura tiveram comentários pertinentes dos participantes do grupo focal. Em resumo, entender melhor como fazer as conexões entre os assuntos e definir como conectar os elementos da estrutura para que fique organizado de forma lógica e detalhada, estas sugestões serão importantes na construção do artefato final. A etapa de validação econômico-financeira também foi bastante discutida e alguns pontos importantes foram levantados sobre como avaliar este assunto em diferentes perspectivas. Por fim, importante ressaltar que a estrutura apresentada teve alta relevância e alta possibilidade de replicação pelos participantes do grupo focal, essa validação é importante, visto que, não se trata de um estudo de caso, mas sim, uma estrutura conceitual que pode ser utilizada por demais interessados.

5.3 ESTRUTURA CONCEITUAL FINAL

Buscando aprimorar a eficácia e a usabilidade da estrutura conceitual proposta neste trabalho, neste capítulo será realizada uma revisão considerando as alterações importantes propostas pelos participantes do grupo focal.

5.3.1 Estrutura revisada

Após realizar as entrevistas junto ao grupo focal e analisar as melhorias propostas, foi possível construir uma estrutura conceitual final. As sugestões e indagações feitas pelos participantes, foram fundamentais para esta etapa, pois além da contribuição para ajustar a estrutura, foi necessário alterar o seu formato. A relação entre todos os elementos da estrutura foi repensada, a fim de, proporcionar maior detalhamento e relacionamento entre as etapas. Além disso, novas etapas foram criadas. Neste novo formato, as 5 etapas de focalização da TOC são as norteadoras da estrutura conceitual e a partir disso, as etapas 2 e 3 (perdas x tecnologias e validação econômico-financeira) foram incluídas dentro da etapa 4 da focalização. Além disso, foram desenvolvidas novas etapas que são mostradas no quadro 9:

Quadro 9: Etapas da TOC x Etapas da estrutura conceitual

ETAPAS DA TOC	ETAPAS DA ESTRUTURA
1- IDENTIFICAR A RESTRIÇÃO	1- IDENTIFICAR A RESTRIÇÃO
2- EXPLORAR A RESTRIÇÃO	2- EXPLORAR A RESTRIÇÃO
3- SUBORDINAR O SISTEMA	2.1 TECNOLOGIAS DE BASE
4- ELEVAR A RESTRIÇÃO	2.2 VALIDAÇÃO DA TECNOLOGIA
5- VOLTAR AO PRIMEIRO PASSO	2.3 VALIDAÇÃO ECONÔMICO-FINANCEIRA
	3- SUBORDINAR O SISTEMA
	4- ELEVAR A RESTRIÇÃO
	4.1 ANÁLISE PERDA X TECNOLOGIAS DE FRONT
	4.2 VALIDAÇÃO DA TECNOLOGIA
	4.3 VALIDAÇÃO ECONÔMICO-FINANCEIRA
	5- VOLTAR AO PRIMEIRO PASSO

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

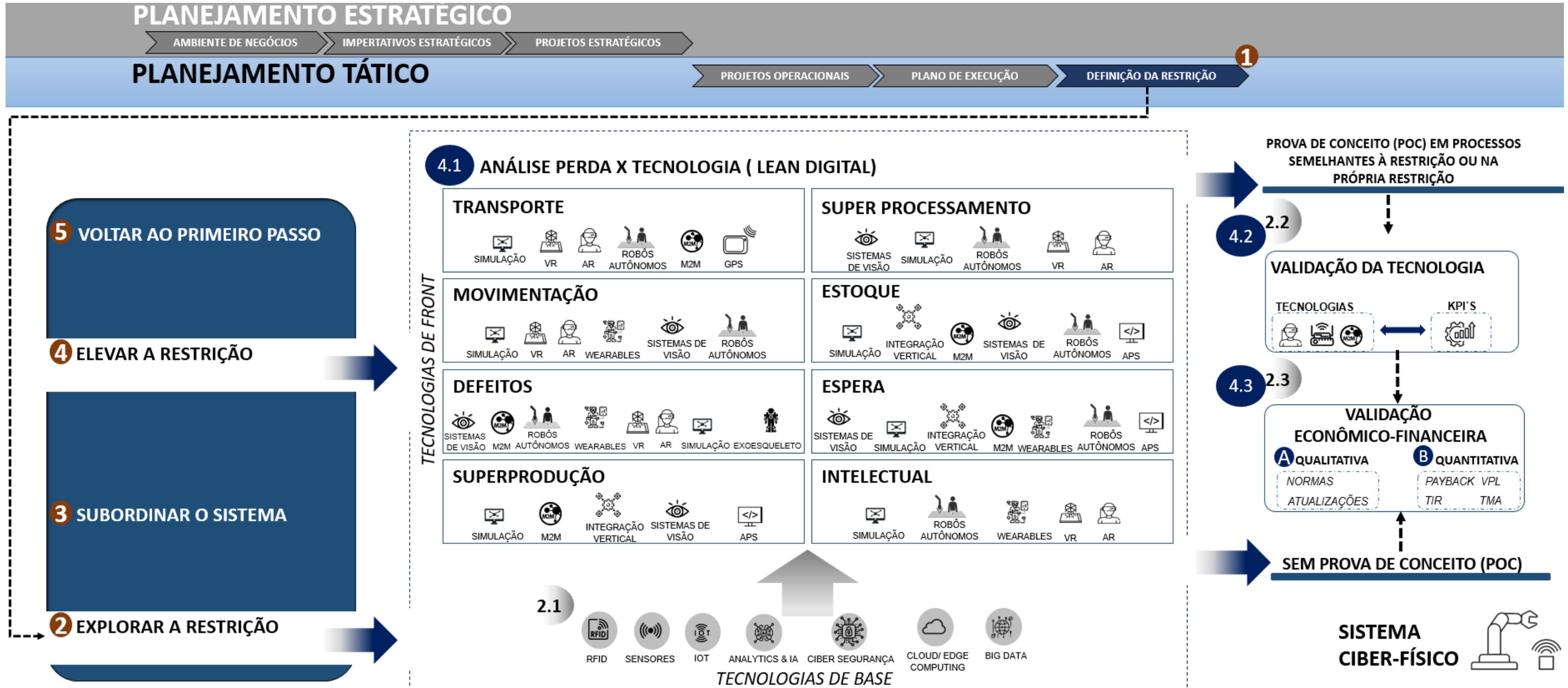
Seguindo no novo formato com as etapas da focalização da TOC como direcionador, a estrutura sugere que a identificação da restrição ocorra após o desdobramento da estratégia, atuando na camada tática de análise. Essa conexão entre as etapas é muito importante, pois se obtém a governança necessária e clareza da atuação ao longo do ano. A etapa 2 deve explorar a restrição, ou seja, garantir que todo o produto produzido seja realmente para atender a demanda de mercado e a proteção necessária realizada de forma apropriada. Outro ponto importante é a capacidade na restrição, então, é necessário evitar altos tempos de *setup*, altos tempo de parada, tempos elevados durante mudanças de turnos, entre outros. Neste sentido, a utilização das tecnologias de base nesta etapa (etapa 2.1) podem permitir uma tomada de decisão baseada em dados. Com a sua utilização, as tecnologias de base podem passar por uma validação técnica da tecnologia, chamada de POC (etapa 2.2) e conseqüentemente de uma validação econômico-financeira (etapa 2.3). Por fim, o novo formato traz o sistema ciber- físico contemplando todas as atividades do mundo físico e virtual, esta mudança também foi considerada após a validação com o grupo focal, sendo que o conceito de sistema ciber-físico não é somente ser uma tecnologia da I4.0, mas sim as interações entre o mundo virtual e físico. Ele está visualmente representado no canto inferior direito da estrutura.

Já na etapa 3 os demais recursos devem produzir somente o necessário analisando o fluxo e não mais analisando localmente, com isso, se reduz a produção em

excesso. Para elevar o desempenho do sistema, no passo 4 são incluídas todas as validações realizadas neste trabalho. No item 4.1, a partir das perdas do Lean encontradas na restrição é possível verificar a tecnologia apropriada que pode ser utilizada. Na sequência com o item 4.2, é realizada a validação dessa tecnologia, também chamada de prova de conceito (POC) ou seja, é mensurado o seu verdadeiro impacto ao aplicá-la no processo. Essa etapa pode ser realizada diretamente no gargalo ou em processo semelhante, a possibilidade deve ser analisada pela criticidade do processo ou da tecnologia que será utilizada. Outro fator importante nessa etapa é sempre que possível, monitorar um indicador chave do processo para que se obtenha as comprovações dos ganhos. Com os dados do estado atual do processo e os ganhos obtidos após a implementação da POC, é realizada a validação econômico-financeira (etapa 4.3). Neste fluxo, normalmente a validação será quantitativa, partindo de análises como a TMA, TIR, VPL ou *payback*. O método utilizado irá depender do padrão e regras que cada empresa utiliza.

Outro fluxo existente na validação econômico-financeira está normalmente relacionado a aquisição de sistemas, como por exemplo, MES, ERP, SCADA, etc... nestes casos, como são aplicações sistêmicas, de alto investimento e fornecedores líderes de mercado, não existe normalmente uma validação da tecnologia (POC). Porém, a validação econômico-financeira continua existindo. A empresa precisa apresentar estudos de quais serão os ganhos obtidos na sua implementação, podendo ser eles qualitativos ou quantitativos. Os ganhos qualitativos podem estar relacionados a questões de segurança, ergonomia, agilidade e qualidade da informação, atualizações de sistemas, entre outros. Após a elevação da restrição com a etapa 4, o gargalo do fluxo analisado pode ter sido modificado. Sendo assim, a etapa 5 indica para que se volte ao primeiro passo, que é definir a nova restrição. Na figura 23 segue a construção da estrutura conceitual final:

Figura 24: Estrutura conceitual final



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

6 CONCLUSÃO

As pesquisas em relação ao Lean Digital têm crescido nos últimos anos e um dos principais fatores é por conta do avanço dos conceitos e aplicações das tecnologias da I4.0. Outro fator importante a ser considerado neste contexto é a agilidade com que novas tecnologias têm surgido ano após ano, desta forma, este trabalho ampliou os estudos relacionados ao assunto. Embora a literatura e pesquisas estejam em crescimento, ainda existem lacunas a serem exploradas no que tange à utilização de métodos estruturados que auxiliem na conexão dos elementos que compõem o Lean Digital, bem como, que façam a relação das tecnologias com as perdas do Lean. Muitos trabalhos ainda têm focado na relação das ferramentas do Lean e das tecnologias da I4.0, o que também é válido, porém ao limitar os estudos a níveis de ferramentas, pode ocorrer de o problema em si não ser solucionado.

Em relação à pergunta proposta pelo trabalho de como relacionar a implementação das tecnologias da I4.0 por meio das perdas do Lean, considerando etapas que auxiliem o ganho sistêmico e garantindo os benefícios econômico-financeiros, o trabalho teve seu objetivo atingido, visto que, a estrutura conceitual propõe a sinergia das perdas do Lean com as principais tecnologias utilizadas atualmente na I4.0. Ao todo 18 tecnologias da I4.0 foram relacionadas à cada uma das 8 perdas do Lean. Além disso, a estrutura, por meio das etapas de focalização da TOC contribui para a maximização dos ganhos das empresas. Junto a isso, uma etapa de validação econômico-financeira das melhorias e tecnologias propostas, garantindo assim, um fluxo sustentável de implementação. Sendo assim, a estrutura orienta as empresas em seu caminho para identificar potenciais para aumentar a eficiência, a produtividade e a lucratividade.

A estrutura conceitual proposta apresenta um possível caminho para as empresas em busca de aprimorar suas operações no dia a dia. As cinco etapas da focalização da (TOC), permite às organizações identificar e priorizar os gargalos que limitam sua capacidade produtiva. Isso, por sua vez, direciona os recursos e esforços da empresa para os pontos cruciais, aumentando a eficiência global das operações e auxiliando em tomadas de decisões que vão de fato gerar resultados no dia a dia.

Na etapa 2 a estrutura conecta as tecnologias de base que podem auxiliar as empresas a implementarem soluções que forneçam e tornem a visibilidade dos dados de maneira confiável e com isso, possibilitando direcionamentos importantes para as tomadas de ações. Na etapa 4 da focalização da TOC as tecnologias de front da I4.0 estão demonstradas em cada uma das oito perdas do Lean que podem ser aplicadas para mitigá-las. Isso proporciona às

empresas uma abordagem concreta para eliminar ineficiências e desperdícios em suas operações, otimizando recursos e reduzindo custos.

Finalmente, a terceira etapa da estrutura conceitual foca na validação econômico-financeira das tecnologias propostas, garantindo que sua implementação resulte em benefícios tangíveis para a empresa. Isso não apenas ajuda a justificar os investimentos necessários, mas também fornece uma base sólida para a tomada de decisões estratégicas. Em resumo, essa estrutura conceitual oferece um guia prático para empresas melhorarem suas operações diárias, aumentando sua competitividade e sucesso no mercado.

Outro fator importante da estrutura, é orientar que a definição da restrição da empresa seja definida dentro de um planejamento que envolva os objetivos estratégicos e táticos. Essa etapa é importante para que a empresa consiga implementar as melhorias de forma sistemática. Quando o Lean Digital é implementado com sucesso, as organizações podem esperar uma melhor produtividade e um retorno sobre o investimento (ROI) maior do que, quando comparado com projetos isolados de melhoria Lean tradicional ou digital (DELOITTE 2020).

Em relação à metodologia, este estudo foi classificado como pesquisa aplicada com abordagem qualitativa. Além disso, foi conduzido como uma pesquisa exploratória, que incluiu um estudo bibliográfico e pessoas com experiência prática na situação explanada, auxiliando no entendimento do problema. O *Design Science Research* foi escolhido como método para guiar o trabalho. Para coletar os dados, foi utilizado o grupo focal, que foi planejado com base nas melhores práticas descritas na literatura. Por meio das entrevistas do grupo focal, foi realizada a análise do conteúdo e realizada as considerações necessárias.

As entrevistas com o grupo focal somaram 4 horas de conteúdo gravado, onde foi apresentado todo o conteúdo contido na proposta da estrutura desenvolvida, com isso, se buscou o entendimento e contribuições dos profissionais altamente qualificados e experientes. Com as contribuições das entrevistas, foi necessária uma mudança visual na estrutural conceitual, adicionando os pontos relevantes e discutidos com os especialistas. Pela experiência do grupo focal nos assuntos, foram realizados ajustes também nas tecnologias que impactavam em cada uma das perdas do Lean, contendo inclusões importantes para minimizar ou eliminar as perdas. Houveram também exclusões por falta de sinergia com a perda apresentada.

Não existe um caminho ou modelo único para a implementação do Lean Digital, cada empresa possui características específicas, porém, a forma como a estrutura foi construída e os elementos contidos nela podem ser utilizados por uma grande diversidade de empresas. Em relação à delimitação do trabalho a estrutura conceitual foi validada de forma empírica, além disso, não considerou as dificuldades da implementação de cada tecnologia relacionada às perdas. Para trabalhos futuros sugere-se como desenvolvimento:

- Aplicação, através de um estudo de caso, do modelo revisado em uma organização;
- Desenvolver um modelo de maturidade e implementação em cada perda considerando as dificuldades de implementação de cada tecnologia;
- Explorar as outras dimensões referentes a *Smart Product* e *Smart Supply Chain* do trabalho de Frank *et al*, (2019).
- Incluir a análise dos conhecimentos necessários pelas pessoas.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO JR, V.; BALDO, C.R. Assessment of the impact of Industry 4.0 on the skills of Lean professionals. **Procedia CIRP**, v. 96, p. 225-229, 2021.
- ALBERTIN, M. et al. Principais inovações tecnológicas da indústria 4.0 e suas aplicações e implicações na manufatura. **XXIV Simpósio de Engenharia de Produção**. Bauru, 2017
- ALVES, J. A.; SANTOS, A. P. Logística Lean para redução dos efeitos da variação da demanda no abastecimento de linhas de produção. **Revista eletrônica de Ciências Sociais Aplicadas, Campo Mourão, PR**, v. 8, n. 1, p. 53-66, 2013.
- AMMAR, M. et al. Improving material quality management and manufacturing organizations system through Industry 4.0 technologies. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 5089-5096, 2021.
- BAHRIN, M.A.K. et al. Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. **Jurnal teknologi**, v. 78, n. 6-13, 2016.
- BALDASSARRE, Antonio. et al. Industrial exoskeletons from bench to field: Human-machine interface and user experience in occupational settings and tasks. **Frontiers in Public Health**, v. 10, p. 4375, 2022.
- BAUERNHANSL, T.; SCHATZ, A.; JÄGER, J. Komplexität bewirtschaften–Industrie 4.0 und die Folgen. **Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb**, v. 109, n. 5, p. 347-350, 2014.
- BEIER, G. et al. Industry 4.0: How it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes–A literature review. **Journal of cLeaner production**, v. 259, p. 120856, 2020.
- BENEVIDES, G.; ANTONIOLLI, P. D.; ARGOUD, A.R.T.T. A eficiência da gestão de estoques: estudo sobre a aplicação do Lean manufacturing. **Revista de tecnologia aplicada**, v. 2, n. 2, 2015.
- BHULLAR, G. et al. Vision System Experimentation in Furniture Industrial Environment. **Future Internet**, v. 13, n. 8, p. 189, 2021.
- BIAZOTI, Leonardo Camargo. **Valorização económica e financeira de um projeto de energias renováveis implementado em fazendas**. 2022. Tese de Doutorado.
- BREALEY, RICHARD A.; MYERS, STEWART C. **Principles of Corporate Finance**. Editora McGraw-Hill, 6ª Edição, 2000.
- 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. 56, n. 8, p. 2924-2940, 2018.
- CAMPOS, Vicente Falconi. Gerenciamento pelas diretrizes (Hoshin Kanri). In: **Gerenciamento pelas diretrizes (Hoshin Kanri)**. 1996. p. 331-331.
- CARVALHO, N. et al. Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in sustainable manufacturing. **Procedia Manufacturing**, v. 21, p. 671-678, 2018.

CHAKRAVARTHI, V. S. Internet of Things: An Introduction. **Internet of Things and M2M Communication Technologies: Architecture and Practical Design Approach to IoT in Industry 4.0**, p. 1-18, 2021.

CIFONE, F. D. et al. 'Lean 4.0': How can digital technologies support Lean practices? **International Journal of Production Economics**, v. 241, p. 108258, 2021.

CIFONE, F. D.; STAUDACHER, A. Do repetitive and non-repetitive companies equally benefit from Lean 4.0? **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 33, n. 1, p. 84-102, 2022.

COX III, James F.; SCHLEIER, John G. **Handbook da teoria das restrições**. Bookman Editora, 2013.

DALL'AGNOLL, C.M. et al. Grupos focais como estratégia metodológica em pesquisas na enfermagem. **Revista Gaúcha de Enfermagem**, v. 20, n. 1, p. 5-5, 1999.

DANESHJO, N. et al. Software support for optimizing layout solution in Lean production. **TEM Journal**, v. 7, n. 1, p. 33, 2018.

DA SILVA, E.L.; MENEZES, E.M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. **UFSC, Florianópolis, 4a. edição**, v. 123, 2005.

DAVIS, N. et al. 4th industrial revolution design through Lean foundation. **Procedia Cirp**, v. 91, p. 306-311, 2020.

DE ASSIS DORNELLES, J.; AYALA, N.F.; FRANK, A.G. Smart Working in Industry 4.0: How digital technologies enhance manufacturing workers' activities. **Computers & Industrial Engineering**, v. 163, p. 107804, 2022.

DELOITTE. **Digital Lean Manufacturing**. 2020. Acesso online: <https://www.deloitte.com/global/en/our-thinking/insights/topics/digital-transformation/industry-4-0/digital-Lean-manufacturing.html> (acesso em 15 Outubro de 2022).

DELOITTE. **Predictive Maintenance and the Smart Factory**. 2022. Acesso online: <https://www2.deloitte.com/us/en/pages/operations/articles/predictive-maintenance-and-the-smart-factory.html> (acesso em 20 Dezembro 2022)

DE LOOZE, M. P. et al. Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. **Ergonomics**, v. 59, n. 5, p. 671-681, 2016.

DEUSE, J. et al. Systematic combination of Lean Management with digitalization to improve production systems on the example of Jidoka 4.0. **International Journal of Engineering Business Management**, v. 12, p. 1847979020951351, 2020.

DIAS, R.M.F.; TENERA, A. Integrating Balanced Scorecard and Hoshin Kanri a review of approaches. **Independent Journal of Management & Production**, v. 11, n. 7, p. 2899-2924, 2020.

DOMBROWSKI, U.; WULLBRANDT, J.; FOCHLER, S. Center of excellence for Lean enterprise 4.0. **Procedia Manufacturing**, v. 31, p. 66-71, 2019.

DOMINGUES, A; BUENO, M; LOPES, M. Análise comparativa: Lean manufacturing e indústria 4.0. **Logística 4.0 & a sociedade do conhecimento**.2019

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; JUNIOR, José Antonio Valle Antunes. **Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Bookman Editora, Porto Alegre, 2020.

DUARTE, Jorge, BARROS, Antonio. **Métodos e técnicas de pesquisa em comunicação**. 2.ed - São Paulo: Atlas, 2011.

FECHTER, Manuel et al. Axiomatic design approach for human-robot collaboration in flexibly linked assembly layouts. **Procedia CIRP**, v. 50, p. 629-634, 2016.

FERREIRA, C. et al. iLeanDMAIC—A methodology for implementing the Lean tools. **Procedia Manufacturing**, v. 41, p. 1095-1102, 2019.

FERRO, J. R. Logística Lean: Passo Seguinte na Transformação. **Lean Institute Brasil**, 2006.

FRAGAPANE, G. et al. Increasing flexibility and productivity in Industry 4.0 production networks with autonomous mobile robots and smart intralogistics. **Annals of operations research**, v. 308, n. 1-2, p. 125-143, 2022.

FRANK, Alejandro Germán; DALENOGARE, Lucas Santos; AYALA, Néstor Fabián. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. **International Journal of Production Economics**, v. 210, p. 15-26, 2019.

GALLO, T. et al. Industry 4.0 tools in Lean production: A systematic literature review. **Procedia Computer Science**, v. 180, p. 394-403, 2021.

GARROCHO, Charles Tim Batista et al. Blockchain-based process control and monitoring architecture for vertical integration of industry 4.0. **arXiv preprint arXiv:2007.05788**, 2020.

GAYER, B. **Método para avaliação do uso de sistemas de produção puxada. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado de Engenharia de Produção)**—Faculdade Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul—UFRGS, Porto Alegre. 2019.

GHINATO, P. **Tópicos Especiais em Engenharia de Produção – Sistemas Lean** Porto Alegre, RS: UFRGS. Apostila da Disciplina de Tópicos Especiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, UFRGS. 2018.

GHOBAKHLOO, Morteza; FATHI, Masood. Corporate survival in Industry 4.0 era: the enabling role of Lean-digitized manufacturing. **Journal of Manufacturing Technology Management**, 2020.

GHOBAKHLOO, Morteza et al. Industry 4.0, innovation, and sustainable development: A systematic review and a roadmap to sustainable innovation. **Business Strategy and the Environment**, v. 30, n. 8, p. 4237-4257, 2021.

GIACON, E.; MESQUITA, M. A. Levantamento das práticas de programação detalhada da produção: um survey na indústria paulista. **Revista Gestão & Produção**. v. 18, n. 3, p. 487-498, 2011.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Científica Social**. 7ª edição. São Paulo: Atlas, 2019.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar um projeto de pesquisa**. 7ª edição São Paulo: Atlas, 2022.

GOMES, J.M. **Elaboração e análise de viabilidade econômica de projetos: tópicos práticos de finanças para gestores não financeiros**. São Paulo: Atlas, 2013

GRAVEL, David P.; NEWMAN, Wyatt S. Flexible robotic assembly efforts at Ford Motor Company. In: **Proceeding of the 2001 IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC'01) (Cat. No. 01CH37206)**. IEEE, 2001. p. 173-182.

HADDUD, A.; KHARE, A. Digitalizing supply chains potential benefits and impact on Lean operations. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 11, n. 4, p. 731-765, 2020.

HOEFT, S. **Histórias do meu Sensei: duas décadas de aprendizado implementando os princípios do Sistema Toyota de Produção**. Bookman Editora, 2013.

HU, Lishuan; XIANG, Caihong; QI, Chengming. Research on traceability of cold chain logistics based on RFID and EPC. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP publishing, 2020. p. 012167.

JAVAID, Mohd et al. Exploring relationships between Lean 4.0 and manufacturing industry. **Industrial Robot: the international journal of robotics research and application**, v. 49, n. 3, p. 402-414, 2021.

JUNIOR, L.S.A. **Gestão de custos e análise de viabilidade financeira**– São Paulo: **Platos Soluções Educacionais S.A.**, 2021. 44 p.

KAGERMANN, H. et al. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group**. Forschungsunion, 2013.

KANG, Hyong Seok et al. **Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions**. International journal of precision engineering and manufacturing-green technology, v. 3, p. 111-128, 2016.

KITZINGER J. The methodology of focus group: the importance of interaction between research participants. **Social Health Illn**. 1994;16(1):103-20.

KOLBERG, Dennis; ZÜHLKE, Detlef. Lean automation enabled by industry 4.0 technologies. **IFAC-PapersOnLine**, v. 48, n. 3, p. 1870-1875, 2015.

KONSTANTINIDIS, Fotios K.; MOUROUTSOS, Spyridon G.; GASTERATOS, Antonios. The role of machine vision in industry 4.0: an automotive manufacturing perspective. In: **2021 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)**. IEEE, 2021. p. 1-6.

KUO, Tsai-Chi et al. Industry 4.0 enabling manufacturing competitiveness: Delivery performance improvement based on theory of constraints. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 60, p. 152-161, 2021.

LEGAT, Christoph; VOGEL-HEUSER, Birgit. A configurable partial-order planning approach for field level operation strategies of PLC-based industry 4.0 automated manufacturing systems. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 66, p. 128-144, 2017.

LIKER, J. K. **O modelo Toyota: 14 princípios de gestão do maior fabricante do mundo**. Porto Alegre: Bookman, 2007.

- LIKER, J.K.; HOSEUS, M. **A cultura Toyota: a alma do Modelo Toyota**; tradução Francisco Araújo da Costa. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre: Bookman, 2009.
- LIKER, J. K.; CONVIS, G. L. **O modelo Toyota de liderança Lean: como conquistar e manter a excelência pelo desenvolvimento de lideranças**. Bookman Editora, 2013.
- LIKER, J. K. **O modelo Toyota:14 princípios de gestão do maior fabricante do mundo**. Porto Alegre: Bookman Editora, 2022.
- LIMA, Victor Bittencourt. **Contribuição de Lean Thinking para a implementação da Indústria 4.0**. 2018. Tese de Doutorado.
- LOT, L.T. et al. Using Lean tools to reduce patient waiting time. **Leadership in health services**, v. 31, n. 3, p. 343-351, 2018.
- MAHDAVISHARIF, Mahsa; CAGLIANO, Anna Corinna; RAFELE, Carlo. Investigating the integration of Industry 4.0 and Lean principles on supply chain: A multi-perspective systematic literature review. **Applied Sciences**, v. 12, n. 2, p. 586, 2022.
- MATHESON, E. et al. Human–robot collaboration in manufacturing applications: A review. **Robotics**, v. 8, n. 4, p. 100, 2019.
- MAURICE, Pauline et al. Evaluation of PAEXO, a novel passive exoskeleton for overhead work. **Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering**, v. 22, n. sup1, p. S448-S450, 2019.
- MAYR, Andreas et al. Lean 4.0-A conceptual conjunction of Lean management and Industry 4.0. **Procedia Cirp**, v. 72, p. 622-628, 2018.
- MOELLER, Tobias et al. Effects of upper-limb exoskeletons designed for use in the working environment-a literature review. **Frontiers in Robotics and AI**, p. 82, 2022.
- MONDEN, Y. **Sistema Toyota de produção: uma abordagem integrada ao just-in-time**. 4. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2015.
- MYERSON, P. **Lean supply chain and logistics management**. New York: McGraw-Hill,2012.
- NEVES, P. et al. Implementing Lean tools in the manufacturing process of trimmings products. **Procedia Manufacturing**, v. 17, p. 696-704, 2018.
- NILSEN, SAMUEL; NYBERG, ERIC. **The adoption of Industry 4.0-technologies in manufacturing: a multiple case study**. 2016.
- OEY, E.; NOFRIMURTI, M. Lean implementation in traditional distributor warehouse-A case study in an FMCG company in Indonesia. **International Journal of Process Management and Benchmarking**, v. 8, n. 1, p. 1-15, 2018.
- OHNO, Taiichi. **O Sistema Toyota de Produção**. Porto Alegre: Bookman, 1999.
- ONOFREJOVA, D.et al. Ergonomic Assessment of Physical Load in Slovak Industry Using Wearable Technologies. **Applied Sciences**, v. 12, n. 7, p. 3607, 2022.
- PACÍFICO, Ilaria et al. Evaluation of a spring-loaded upper-limb exoskeleton in cLeaning activities. **Applied Ergonomics**, v. 106, p. 103877, 2023.

- PAGLIOSA, M.; TORTORELLA, G.; FERREIRA, J.C.E. Industry 4.0 and Lean Manufacturing: A systematic literature review and future research directions. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 32, n. 3, p. 543-569, 2021.
- PARKER, Sandra; WU, Zhe; CHRISTOFIDES, Panagiotis D. Cybersecurity in process control, operations, and supply chain. **Computers & Chemical Engineering**, p. 108169, 2023.
- PEREIRA, Ana C.; ROMERO, Fernando. A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. **Procedia Manufacturing**, v. 13, p. 1206-1214, 2017.
- PEREIRA, J. **Manual de metodologia da pesquisa científica** / José Matias-Pereira. – 4. ed. - [3. Rempr]. – São Paulo: Atlas, 2019.
- PEREIRA, A. C. et al. How Industry 4.0 can enhance Lean practices. **FME Transactions**, v. 47, n. 4, p. 810-822, 2019.
- PERICO, P.; MATTIOLI, J. Empowering process and control in Lean 4.0 with artificial intelligence. In: 2020 **Third International Conference on Artificial Intelligence for Industries (AI4I)**. IEEE, 2020. p. 6-9.
- PIRASTEH, Reza M.; KANNAPPAN, Srinivasan. The synergy of continuous process improvement. **Industrial Engineer**, v. 45, n. 6, p. 41-45, 2013
- POTTER, C. H.; HANCKE, G. P.; SILVA, B. J. Machine-to-machine: Possible applications in industrial networks. In: 2013 **IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)**. IEEE, 2013. p. 1321-1326.
- PRINZ, C.; KREGGENFELD, N.; KUHLENKÖTTER, B. Lean meets Industrie 4.0—a practical approach to interlink the method world and cyber-physical world. **Procedia Manufacturing**, v. 23, p. 21-26, 2018.
- PURUSHOTHAMAN, M.; SEADON, J.; MOORE, D. Waste reduction using Lean tools in a multicultural environment. **Journal of cLeaner production**, v. 265, p. 121681, 2020.
- RIZKYA, I. et al. 5S implementation in welding workshop—a Lean tool in waste minimization. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2019. p. 012018.
- ROMERO, D. et al. The operator 4.0: Human cyber-physical systems & adaptive automation towards human-automation symbiosis work systems. In: **Advances in Production Management Systems. Initiatives for a Sustainable World: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2016, Iguassu Falls, Brazil, September 3-7, 2016, Revised Selected Papers**. Springer International Publishing, 2016. p. 677-686.
- RÖPER, Thiago Sampaio. **Sistema de visão computacional para otimização de corte de madeira em máquina refiladeira**. 2019. Tese de Doutorado.
- ROSSI, Arthur Henrique Gomes et al. Lean Tools in the Context of Industry 4.0: Literature Review, Implementation and Trends. **Sustainability**, v. 14, n. 19, p. 12295, 2022.
- ROSSINI, Matteo et al. The interrelation between Industry 4.0 and lean production: an empirical study on European manufacturers. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 102, p. 3963-3976, 2019.

SAIF, Subia; WAZIR, Samar. Performance analysis of big data and cloud computing techniques: a survey. **Procedia computer science**, v. 132, p. 118-127, 2018.

SALGADO, Eduardo Gomes et al. Análise da aplicação do mapeamento do fluxo de valor na identificação de desperdícios do processo de desenvolvimento de produtos. **Gestão & Produção**, v. 16, p. 344-356, 2009

SANTOS, B.P. et al. The Synergic Relationship Between Industry 4.0 and Lean Management: Best Practices from the Literature. **Management and Production Engineering Review**, v. 12, 2021.

SATO, Junichi et al. Capturing benefits of M2M in manufacturing. **Hitachi Review**, v. 63, n. 1, p. 25, 2014.

SAXBY, Robert; CANO-KOUROUKLIS, Michele; VIZA, Evi. An initial assessment of Lean Management methods for Industry 4.0. **The TQM Journal**, v. 32, n. 4, p. 587-601, 2020.

SCHEER, A. W. Industry 4.0: from vision to implementation. Whitepaper Number 5, August-Wilhelm Scheer. **Institute for Digital Products and Processes**, Scheer GMBH, Saarbruecken, Germany. 2015.

SHINGO, S. **O sistema Toyota de produção: o ponto de vista da engenharia de produção** – Porto Alegre: Bookman, 2007.

SCHUH, G., ANDERL, R., DUMITRESCU, R., KRÜGER, A., TEN HOMPEL, M., **Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies**. 2020.

SHEN, Li; STOPHER, Peter R. Review of GPS travel survey and GPS data-processing methods. **Transport reviews**, v. 34, n. 3, p. 316-334, 2014.

SILVA, Â.; FERREIRA, A.C. Impact of Lean Tools on Companies During Industrial Engineering Projects Implementation: A Correlation Study. **In: Industrial Engineering and Operations Management: XXVI IJCIEOM (2nd Edition), Rio de Janeiro, Brazil, February 22–24, 2021 26**. Springer International Publishing, 2021. p. 79-91.

SILVA, P.F. Ritmo, Rotina, Rota, Resiliência e Riscos: Uma Framework para a Análise dos 5Rs da Logística Interna Enxuta. **Dissertação submetida ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Produção**. Porto Alegre, 2022.

SMALLEY, Art. **Criando o sistema puxado nivelado**. São Paulo: Lean Institute Brasil, 2004. 114 p.

SONY, Michael. Industry 4.0 and Lean management: a proposed integration model and research propositions. **Production & Manufacturing Research**, v. 6, n. 1, p. 416-432, 2018.

SOUZA, Alceu. **Decisões financeiras e análise de investimentos: fundamentos, técnicas e aplicações** – 6. ed. – São Paulo : Atlas, 2015.

SRIRAM, G. S. Edge computing vs. Cloud computing: an overview of big data challenges and opportunities for large enterprises. **International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science**, v. 4, n. 1, p. 1331-1337, 2022.

STENTOFT, J. et al. A. Drivers and Barriers for Industry 4.0 Readiness and Practice: A SME Perspective with Empirical Evidence. **In Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences**. Hawaii, HI, USA, 2019; Volume 6, pp. 5155–5164.

TABIM, Verônica Maurer; AYALA, Néstor Fabián; FRANK, Alejandro G. Implementing vertical integration in the industry 4.0 journey: Which factors influence the process of information systems adoption?. **Information Systems Frontiers**, p. 1-18, 2021.

TAMAS, Levente; MURAR, Mircea. Smart CPS: vertical integration overview and user story with a cobot. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 32, n. 4-5, p. 504-521, 2019.

TECHT, U. **Goldratt and the Theory of Constraints**. Ibidem Press, Germany, 2015.

TESCHEMACHER, Ulrich; REINHART, Gunther. Ant colony optimization algorithms to enable dynamic milkrun logistics. **Procedia CIRP**, v. 63, p. 762-767, 2017

TORTORELLA, GG.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**, 2019.

TORTORELLA, G.L. et al. Organizational learning paths based upon industry 4.0 adoption: An empirical study with Brazilian manufacturers. **International Journal of Production Economics**, v. 219, p. 284-294, 2020.

TORTORELLA, Guilherme et al. Towards the proposition of a Lean automation framework: Integrating industry 4.0 into Lean production. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 32, n. 3, p. 593-620, 2021.

TREMBLAY, M. C.; HEVNER, A. R.; BERNDT, D. J. Focus groups for artifact refinement and evaluation in design research. **Communications of the Association for Information Systems**, v. 26, p. 599-618, 2010.

TURNER, Christopher J. et al. Discrete event simulation and virtual reality use in industry: new opportunities and future trends. **IEEE Transactions on Human-Machine Systems**, v. 46, n. 6, p. 882-894, 2016.

UKEY, P. et al. "IMPLEMENTATION OF LEAN TOOLS IN APPAREL INDUSTRY FOR IMPROVING PRODUCTIVITY." **Proceedings on Engineering Sciences (Online)** 3.2 (2022). pp. 696-704.

VACARI, Carlos Alberto. Integração Lean e indústria 4.0. Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia Industrial 4.0. Curitiba, 2019.

VALAMEDE, L.S.; AKARI, 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. 851, 2020.

VANNUCCI, L.R. **Matemática financeira e engenharia econômica – princípios e aplicações** – São Paulo: Blucher, 2013.

VERMA, P.K. et al. Machine-to-Machine (M2M) communications: A survey. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 66, p. 83-105, 2016.

VITHU, P.; MOSES, J. A. Machine vision system for food grain quality evaluation: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 56, p. 13-20, 2016.

XU, Xun et al. Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 61, p. 530-535, 2021

WAGNER, Tobias; HERRMANN, Christoph; THIEDE, Sebastian. Industry 4.0 impacts on Lean production systems. **Procedia Cirp**, v. 63, p. 125-131, 2017

WANG, X. Optimization study based on Lean logistics in manufacturing enterprises. In Proceedings of China Modern Logistics **Engineering; Springer**: Berlin, Germany, 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, 2016.

YANG, X.; PLEWE, D.A. Assistance systems in manufacturing: A systematic review. In: Advances in Ergonomics of Manufacturing: Managing the Enterprise of the Future: Proceedings of the AHFE 2016 International Conference on Human Aspects of Advanced Manufacturing, Florida, USA. **Springer International Publishing**, 2016. p. 279-289.

ZELBST, P. J. et al. Impact of RFID and information sharing on JIT, TQM and operational performance. **Management Research Review**, v. 37, n. 11, p. 970-989, 2014.

ZHANG, B.; NIU, Z.; LIU, C. **Lean tools, knowledge management, and Lean sustainability: The moderating effects of study conventions. Sustainability**, v. 12, n. 3, p. 956, 2020.