

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

Rodrigo Pessotto Almeida

**Gestão de ativos físicos: uma abordagem sob a
perspectiva da avaliação de investimentos em
tecnologias da indústria 4.0**

Porto Alegre

2024

Rodrigo Pessotto Almeida

Gestão de ativos físicos: uma abordagem sob a perspectiva da avaliação de investimentos em tecnologias da Indústria 4.0

Tese 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 Doutor em Engenharia, na área de concentração em Sistemas de Produção.

Orientador: Prof. Francisco José Kliemann Neto, Dr.

Porto Alegre

2024

Rodrigo Pessotto Almeida

Gestão de ativos físicos: uma abordagem sob a perspectiva da avaliação de investimentos em tecnologias da Indústria 4.0

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

Prof. Francisco José Kliemann Neto, Dr.

Orientador PPGEP/UFRGS

Prof. Michel José Anzanello, Dr.

Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professora Joana Siqueira de Souza, Dr. (PPGEP/ UFRGS)

Professor Guilherme Kirch, Dr. (EA / UFRGS)

Professor Gustavo Dalmarco, Dr. (INESC TEC)

AGRADECIMENTOS

Ao grande professor e orientador Francisco José Kliemann Neto, pela sua orientação, as longas conversas e todo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu grande amigo, Prof^o. Néstor Fabian Ayala, pela parceria de sempre, apoio e ensinamentos ao longo de todo este processo.

Aos professores Alejandro Germán Frank e Guilherme Brittes Benitez por todo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos Prof^o. Ricardo Gonçalves de Faria Corrêa e Glauber Busatto pelo apoio e parceria de sempre.

A meu pai (in memoriam), à minha mãe (in memoriam), minha irmã, meus afilhados, Guilherme e Helen, e a todos meus familiares pelo apoio e incentivo.

Aos professores Joana, Guilherme e Gustavo, membros da banca examinadora, pelas suas valiosas contribuições ao trabalho.

Aos amigos que souberem compreender a minha ausência neste período de muita dedicação aos estudos.

Aos colegas, professores e funcionários do PPGEF pelos ensinamentos, amizade, convívio e troca de experiências durante este período.

Finalmente, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram em algum momento neste processo e na conclusão deste trabalho.

RESUMO

A exigência por padrões competitivos de desempenho operacional na indústria, o avanço da literatura e a recente publicação dos padrões normativos da série ISO 55000 são alguns dos fatores que ajudam a explicar o crescimento no interesse pelo tema gestão de ativos físicos nos ambientes corporativos. A gestão de ativos assume um papel relevante em empresas de capital intensivo como, por exemplo, empresas de manufatura, onde a entrega dos produtos e serviços está condicionada pelo desempenho da base de ativos físicos da companhia. Dentre os diversos desafios da gestão de ativos para cumprir com a função de otimizar o desempenho dos ativos está o processo de tomada de decisão. Neste sentido, os avanços tecnológicos trazidos pela Indústria 4.0 apresentam diversas oportunidades para suportar a tomada de decisão ao longo do processo de gestão de ativos. Por outro lado, as empresas enfrentam dificuldades para avaliar a viabilidade da adoção dessas tecnologias. A partir da compreensão do processo de gestão de ativos físicos, o objetivo deste trabalho é desenvolver um framework para orientar a avaliação de investimentos em tecnologias da Indústria 4.0. Na etapa inicial, o estudo apresenta o projeto de pesquisa envolvendo a introdução do tema, os objetivos, a justificativa do tema e os procedimentos metodológicos utilizados ao longo da pesquisa. Na segunda etapa, o estudo buscou desenvolver uma visão geral do processo de gestão de ativos baseado na literatura, padrões normativos e na opinião de especialistas. A terceira etapa desenvolveu uma compreensão geral da gestão de ativos físicos a partir da perspectiva da tomada de decisão. Na quarta etapa é apresentado o framework para avaliação de investimentos em tecnologias da Indústria 4.0, seguido de sua validação através de um estudo de caso conduzido em uma empresa multinacional de manufatura. A quinta e última etapa apresenta as considerações finais deste trabalho.

Palavras-chave: Gestão de ativos; Gestão de ativos físicos; Tomada de decisão; Avaliação de investimentos; Indústria 4.0; Tecnologias da Indústria 4.0.

ABSTRACT

The demand for competitive standards of operational performance in the industry, the advancement of literature, and the recent publication of the normative standards of the ISO 55000 series are some of the factors that help explain the growth in interest in physical asset management in corporate environments. Asset management plays an important role in capital-intensive companies, such as manufacturing companies, where the delivery of products and services is conditioned by the company's physical asset base's performance. Among the various challenges of asset management to fulfil the function of optimizing assets' performance is the decision-making process. In this sense, the technological advances brought by Industry 4.0 present several opportunities to support decision-making throughout the asset management process. On the other hand, companies face difficulties in evaluating the feasibility of adopting these technologies. From the understanding of the physical asset management process, the objective of this work is to develop a framework to guide the evaluation of investments in technologies of Industry 4.0. In the initial stage, the study presents the research project involving the introduction of the theme, the objectives, the justification of the theme and the methodological procedures used throughout the research. In the second stage, the study sought to develop an overview of the asset management process based on the literature, normative standards and expert opinion. The third step developed a general understanding of physical asset management from the perspective of decision making. In the fourth stage, the framework for evaluating investments in technologies in Industry 4.0 is presented, followed by its validation through a case study conducted in a multinational manufacturing company. The fifth and final stage presents the final considerations of this work.

Key words: Asset management, Physical asset management, Decision-making, Investment assessment, Industry 4.0, Industry 4.0 technologies.

LISTA DE FIGURAS

INTRODUÇÃO

Figura 1: Método de trabalho.....	19
--	----

ARTIGO 1

Figura 1: Relações entre os elementos de um sistema de gestão de ativos.....	30
---	----

Figura 2: Relacionamento dos elementos de um sistema de gestão de ativos no contexto organizacional.....	33
---	----

Figura 3: Estrutura de desenvolvimento do framework de GA.....	36
---	----

Figura 4: Framework para GA.....	42
---	----

ARTIGO 2

Figura 1: Fluxo de informações da gestão de ativos no contexto organizacional.....	68
---	----

Figura 2: Fluxo de informações entre os níveis hierárquicos ao longo do processo de gestão de ativos.....	70
--	----

Figura 3: Princípios e fundamentos para orientar a tomada de decisão na gestão de ativos.....	71
--	----

ARTIGO 3

Figura 1: Framework para análise de investimentos em tecnologias.....	109
--	-----

Figura 2: Escores sociotécnico, econômico e financeiro.....	128
--	-----

Figura 3: Categorias de investimentos e pesos.....	129
---	-----

Figura 4: Escores do investimento em tecnologia P8.....	130
--	-----

Figura 5: Processo para seleção de artigos.....	143
--	-----

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Figura 1: Visão geral da tese.....	145
---	-----

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

Tabela 1: Perfil dos especialistas entrevistados.....	37
Tabela 2: Empresas usadas no estudo de caso para o estágio de entrevistas com especialistas.....	37
Tabela 3: status do grau de prontidão.....	39
Tabela 4: Aplicabilidade do framework e nível de prontidão.....	47

ARTIGO 2

Tabela 1: Resumo dos resultados obtidos a partir da avaliação dos elementos de análise nas empresas.....	99
---	----

ARTIGO 3

Tabela 1: Dimensões e critérios sociotécnicos.....	113
Tabela 2: Potenciais investimentos em tecnologias.....	122
Tabela 3: Avaliação Sociotécnica.....	126
Tabela 4: Resultados de STS_i , VPL_i , e $Payback_i$	127
Tabela 5: Parâmetros da curva S.....	128
Tabela 6: Ranking dos potenciais investimentos em tecnologias.....	130

LISTA DE QUADROS

ARTIGO 2

Quadro 1: empresas utilizadas no estudo de caso.....73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Tema	14
1.2	Objetivos.....	14
1.3	Justificativa do tema e dos objetivos	15
1.4	Procedimentos metodológicos	18
1.5	Limitações e delimitações do estudo	20
1.6	Estrutura do trabalho.....	21
1.7	Referências	21
2	ARTIGO 1 - Framework para gestão de ativos físicos em empresas de manufatura no contexto da indústria 4.0.....	26
2.1	Introdução	27
2.2	Fundamentação teórica	28
2.3	Procedimentos metodológicos	36
2.4	Resultados.....	39
2.5	Discussão	48
2.6	Conclusões.....	52
2.7	Referências	54
3	ARTIGO 2 – Gestão de ativos físicos sob a perspectiva da tomada de decisão....	59
3.1	Introdução	60
3.2	Gestão de ativos.....	63
3.3	Modelo conceitual da tomada de decisão na gestão de ativos.....	67
3.4	Procedimentos metodológicos	72
3.5	Resultados.....	73
3.6	Discussão dos resultados	81
3.7	Conclusões e recomendações para pesquisas futuras	85
3.8	Referências	87
3.9	Apêndices	91

4	ARTIGO 3 – Como avaliar investimentos em tecnologias da Indústria 4.0? Um framework multicritério para fatores econômicos, financeiros e sociotécnicos	101
4.1	Introdução	102
4.2	Fundamentação teórica	104
4.3	Framework proposto	108
4.4	Demonstração da aplicação do framework	120
4.5	Discussões e conclusões	131
4.6	Referências	136
4.7	Apêndices	142
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	145

1 INTRODUÇÃO

Fatores como a pressão competitiva por operações cada vez mais sustentáveis, o avanço da literatura e a relativamente recente publicação dos padrões normativos da série ISO 55000 têm transformado a Gestão de Ativos em uma preocupação central para empresas de capital intensivo (Emmanouilidis e Komonen, 2013; Heitz *et al.*, 2016; Roda e Macchi, 2016; Maletič *et al.*, 2017; Maletič *et al.*, 2020; Msongole *et al.*, 2022). Essas empresas apresentam o emprego intensivo de ativos físicos ao longo de suas operações como, por exemplo, empresas de manufatura, onde estes ativos condicionam a entrega de produtos e serviços aos clientes (Porter, 1998; IBM, 2016). Consequentemente, a adoção de práticas inteligentes para o gerenciamento do desempenho dos ativos físicos como, por exemplo, planta, máquinas e veículos, pode trazer contribuições relevantes para a competitividade do negócio (Hampapur *et al.*, 2011; El-Akruti *et al.*, 2013; Greco *et al.*, 2013; Roda e Garetti, 2014; Maletič *et al.*, 2017; Candón *et al.*, 2019; Msongole *et al.*, 2022; Aghabegloo *et al.*, 2024).

Neste sentido, a gestão de ativos representa uma abordagem que orienta a contribuição de valor fornecida pelo desempenho dos ativos físicos para o sucesso organizacional (Amadi-Echendu *et al.*, 2007; El-Akruti *et al.*, 2013; Kans e Galar, 2016). A função atual da gestão de ativos físicos transcende a visão operacional anterior de manutenção de ativos, assumindo a responsabilidade por garantir que base de ativos da organização esteja alinhada com as mudanças nos requisitos do negócio (Amadi-Echendu *et al.*, 2007; El-Akruti *et al.*, 2013; Emmanouilidis e Komonen, 2013; Maletič *et al.*, 2017; Maletič *et al.*, 2020).

Assim, o processo de gestão de ativos deve estabelecer um conjunto de atividades de planejamento e controle coordenadas entre si, de maneira a assegurar a conformidade do desempenho dos ativos com a estratégia organizacional (El-Akruti *et al.*, 2013; El-Akruti e Dwight, 2013; Aghabegloo *et al.*, 2024). Este papel desempenhado pelo processo de gestão de ativos possui potencial significativo para influenciar todas as atividades do ciclo de vida dos ativos, promovendo impactos positivos sobre custos, produtividade, qualidade, segurança, sustentabilidade ambiental, resultados do negócio e alcance das estratégias (El-Akruti *et al.*, 2013; Emmanouilidis e Komonen, 2013; Koukias e Kiritsis, 2015). Portanto, a gestão de ativos traduz os objetivos da organização em decisões financeiras e técnicas, planos e atividades visando estabelecer a melhor relação entre desempenho, custo e risco de sua base de ativos (Brown e Humphrey, 2005; Hastings, 2010; Braaksma e Veldman, 2014; ISO 55000:2014; Mckeown, 2014; Alsyouf *et al.*, 2018).

A definição do processo de tomada de decisão é um dos principais desafios da gestão de ativos (El-Akruti *et al.*, 2013; Macchi *et al.*, 2018; Candón *et al.*, 2019). Segundo Schuman e Brent (2005), El-Akruti *et al.* (2013) e Kans e Galar, (2016), a tomada de decisão precisa adotar uma abordagem integrada e holística do processo de gestão de ativos ao longo de todo o ciclo de vida dos ativos. Diante disso, além da integração de sistemas e dos processos existentes, questões como a disponibilidade e o acesso de dados e informações assumem um papel relevante para suportar o processo de tomada de decisão (Hipkin, 2001; Ouertani *et al.*, 2008; Brous *et al.*, 2018; Macchi *et al.*, 2018; Marquez *et al.*, 2020).

Embora a preocupação com dados e informações já seja abordada há bastante tempo (Hipkin, 2001; Brown e Humphrey, 2005; Ouertani *et al.*, 2008; Borek *et al.* 2014; Macchi *et al.*, 2018), recentemente esta questão passou a ter maior relevância decorrente do acelerado avanço tecnológico (Brous *et al.*, 2018; Macchi *et al.*, 2018). Segundo IBM (2016), Brous *et al.*, (2018), Spüntrup e Imsland (2018), e Marquez *et al.*, (2020) tecnologias da Indústria 4.0 fornecem novas oportunidades para a gestão de ativos, principalmente pela utilização de dados e informações na tomada de decisão, que promovem melhores resultados para as organizações.

Além disso, com a crescente aplicação de tecnologias de sensoriamento, é cada vez maior a quantidade de dados coletados (Macchi *et al.*, 2018). A partir da *Internet of Things* (IoT) estes dados podem ser acessados em tempo real (Brous *et al.*, 2018), e imediatamente são enviados para um serviço de nuvem (*Cloud Computing*), onde ficam armazenados (IBM, 2016). Deste modo, a tecnologia IoT permite monitorar e controlar o mundo físico à distância (Brous *et al.*, 2018). Uma vez capturados e armazenados os dados, a aplicação de ferramentas de *Data Analytics* fornece informações e capacidade preditiva em termos do funcionamento dos ativos que permitem ajustar seu desempenho (IBM, 2016; Macchi *et al.*, 2018). Isto mostra algumas das muitas oportunidades para a gestão de ativos a partir da introdução de tecnologias habilitadoras ao longo das operações (IBM, 2016; Brous *et al.*, 2018; Macchi *et al.*, 2018). Portanto, a presença destes elementos contribui diretamente para que a tomada de decisão seja assertiva no sentido de promover o alinhamento da estrutura e do desempenho dos ativos físicos com os objetivos e necessidades do negócio (Hastings, 2010; El-Akruti, 2012; El-Akruti *et al.*, 2013; Emmanouilidis e Komonen, 2013; ISO 55002:2014; Maletič *et al.*, 2017; Maletič *et al.*, 2020; Aghabegloo *et al.*, 2024).

Embora já tenham sido identificados e reconhecido diversos benefícios da introdução de tecnologias da Indústria 4.0 para melhorar o desempenho operacional dos ativos (BCG, 2019; Dalmarco *et al.*, 2019), a implementação destas tecnologias ainda traz desafios a serem superados por estas organizações (Schuh *et al.*, 2017; Cheng *et al.*, 2018; BCG, 2019; Joppen *et al.*, 2019).

Aspectos como a baixa *expertise* e prontidão cultural para conduzir as transformações tecnológicas, disponibilidade limitada de recursos de Tecnologia da Informação (TI) (BCG, 2019), bem como a necessidade de altos investimentos (Liao *et al.*, 2017; Cheng *et al.*, 2018; Joppen *et al.*, 2019), são alguns dos desafios enfrentados pelas organizações. Igualmente, dificuldades para justificar a viabilidade econômica juntamente com as incertezas relacionadas aos custos de implementação e benefícios fornecidos pelas tecnologias se traduzem em obstáculos para a implementação destas tecnologias (Cheng *et al.*, 2018; Kamble *et al.*, 2018; Ghobakhloo, 2019; Joppen *et al.*, 2019). Deste modo, a tomada de decisão de investimentos em tecnologias da Indústria 4.0 constitui um desafio atual e relevante a ser explorado tanto no meio acadêmico como no ambiente de negócios (Tan *et al.*, 2011; Häckel *et al.*, 2015; Schuh *et al.*, 2017; Cheng *et al.*, 2018; Joppen *et al.*, 2019; Marquez *et al.*, 2020).

Neste sentido, este estudo explora a gestão de ativos físicos em empresas de capital intensivo a partir de uma abordagem holística, envolvendo os níveis estratégico, tático e operacional (El-Akruti *et al.*, 2013; Kans e Galar, 2016). São abordados os aspectos relacionados ao fluxo de informações e avaliação de investimentos, de forma a compreender o processo de tomada de decisão da gestão de ativos. Por fim, além de identificar os fatores que afetam a tomada de decisão de investimentos, este trabalho apresenta um framework para orientar o processo de avaliação de investimentos em tecnologias da Indústria 4.0.

1.1 Tema

O tema de pesquisa desta tese contempla as áreas de gestão de ativos físicos e avaliação de investimentos. De modo geral, o tema desta pesquisa envolve a investigação do papel da avaliação de investimento no processo de decisão da gestão de ativos físicos. Dentro da área de avaliação de investimentos, o tema desta pesquisa concentra-se especificamente na avaliação de investimentos em tecnologias da Indústria 4.0, enfatizando a tomada de decisão de investimentos em empresas de manufatura.

1.2 Objetivos

O objetivo geral desta tese é estruturar um framework para orientar a tomada de decisão de investimentos em tecnologias da Indústria 4.0, particularmente em empresas de manufatura, a

partir do entendimento do papel da tomada de decisão de investimentos no processo de gestão de ativos físicos.

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, é necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterizar o processo de gestão de ativos físicos em empresas de manufatura a partir da literatura existente e do conhecimento de especialistas;
- b) Compreender o processo de tomada de decisão e as práticas empregadas para a gestão de ativos físicos em empresas de manufatura;
- c) Identificar os fatores e técnicas relevantes para orientar a tomada de decisão de investimentos em ativos no contexto da Indústria 4.0;
- d) Estruturar um framework para orientar a tomada de decisão de investimentos, integrando a literatura e o conhecimento de especialistas;
- e) Avaliar o framework proposto através de um estudo de caso em uma empresa de manufatura, visando explorar as proposições desenvolvidas ao longo deste trabalho, e discutindo os principais pontos fortes, pontos fracos, vantagens e desvantagens associadas.

1.3 Justificativa do tema e dos objetivos

Para Porter (1998), uma empresa ganha vantagem competitiva ao realizar atividades estrategicamente relevantes para o seu negócio de forma mais barata ou melhor do que seus concorrentes. Assim, o sucesso de empresas de capital intensivo como, por exemplo, empresas de manufatura, em muito dependem da assertividade na determinação e na forma de utilização da sua estrutura de ativos físicos (Aghabegloo *et al.*, 2024). Estes ativos fornecem potenciais para a organização gerar receita por meio de serviços ou produtos, ao mesmo tempo em que exigem custos de operação e esforços para garantir uma utilização efetiva. Neste sentido, a gestão de ativos é uma abordagem que pode contribuir com o processo de criar e sustentar vantagens competitivas (Porter, 1998; Ouertani *et al.*, 2008; Hastings, 2010; Hampapur *et al.*, 2011; El-Akruti, 2012; El-Akruti *et al.*, 2013; Maletič *et al.*, 2017; Candón *et al.*, 2019; Aghabegloo *et al.*, 2024).

A partir do desafio das organizações de maximizar o valor fornecido pelos ativos ao longo do ciclo de vida (IBM, 2016), a gestão de ativos passa a ser uma questão central para as organizações, e principalmente para empresas altamente dependentes do desempenho dos ativos físicos para entregar seus produtos e serviços como, por exemplo, empresas de manufatura (Emmanouilidis e Komonen, 2013; Maletič *et al.*, 2017; Aghabegloo *et al.*, 2024). Esta relevância

surge em virtude de que, além de estimular a obtenção de valor dos ativos, a gestão de ativos deve determinar um conjunto de atividades e procedimentos para promover o gerenciamento otimizado dos ativos físicos, estabelecendo a melhor relação entre custo, risco e desempenho (Brown e Humphrey, 2005; Mitchell, 2006; Hastings, 2010; ISO 55000: 2014; Alsyouf *et al.*, 2018; Petchrompo e Parlikad, 2019; Maletič *et al.*, 2020).

Outro aspecto que tem promovido o aumento no interesse da gestão de ativos nos ambientes de negócios e acadêmico é a relativamente recente publicação dos padrões normativos da série ISO 55000 (Emmanouilidis e Komonen, 2013; El-Akruti *et al.*, 2013; Backman e Helaakoski, 2016; Maletič *et al.*, 2017; Alsyouf *et al.*, 2018; Macchi *et al.*, 2018; Petchrompo e Parlikad, 2019). Assim, para assegurar o alinhamento entre o desempenho da base de ativos físicos e as necessidades do negócio, as organizações precisam estruturar um processo integrado de gestão de ativos, envolvendo os níveis operacional, tático e estratégico (El-Akruti *et al.*, 2013; Emmanouilidis e Komonen, 2013; Qiu *et al.*, 2015; Kans e Galar, 2016; Marquez *et al.*, 2020).

Além desta integração, um dos elementos mais importantes da gestão de ativos é a estruturação do processo de tomada de decisões relacionadas aos ativos (El-Akruti *et al.*, 2013; Macchi *et al.*, 2018; Maletič *et al.*, 2020; Marquez *et al.*, 2020). Diante disso, a gestão de ativos apresenta grande dependência da integração de sistemas e processos existentes (Hipkin, 2001), bem como da disponibilidade de dados e informações para suportar a tomada de decisão (Brous *et al.*, 2018). Desse modo, o processo de gestão de ativos deve estabelecer mecanismos para promover a integração e o fluxo de informações para suportar a tomada de decisão ao longo de todo o ciclo de vida dos ativos (Hipkin, 2001; Amadi-Echendu *et al.*, 2007; Ouertani *et al.*, 2008; El-Akruti, 2012; El-Akruti *et al.*, 2013; Heitz *et al.*, 2016; Marquez *et al.*, 2020).

Segundo Schuman e Brent (2005), El-Akruti *et al.* (2013), e Aghabegloo *et al.* (2024) um dos grandes desafios para empresas de capital intensivo é a implementação de uma abordagem holística e integrada do processo de gestão de ativos. Neste sentido, muitos destes desafios podem ser alcançados a partir das oportunidades trazidas pelo desenvolvimento tecnológico da Indústria 4.0, que promove inúmeras potencialidades para a implementação efetiva da gestão de ativos (Macchi *et al.*, 2018; Spüntrup e Imsland, 2018; Marquez *et al.*, 2020). As novas tecnologias ajudam a superar problemas como, por exemplo, a distância temporal entre atividades ao longo do ciclo de vida dos ativos, integração entre as áreas da organização, além de permitir a disponibilidade e acesso imediato a dados e informações para suportar o processo de tomada de decisão (Emmanouilidis e Komonen, 2013; Brous *et al.*, 2018; Macchi *et al.*, 2018; Spüntrup e Imsland, 2018; Marquez *et al.*, 2020). Estas tecnologias fornecem, além de benefícios operacionais

como, por exemplo, flexibilidade e adaptabilidade, a capacidade de coletar e analisar grandes quantidades de dados em tempo real (Kagermann *et al.*, 2013; Porter e Heppelmann, 2014; Dalenogare *et al.*, 2018).

Atualmente as empresas já reconhecem o papel dos dados como elementos para aprimorar a tomada de decisão e melhorar o desempenho operacional dos ativos (BCG, 2019). A digitalização pode ser entendida como um processo de transformação que traz diversas oportunidades para as operações a partir da introdução de tecnologias habilitadoras (Macchi *et al.*, 2018). Isto fornece elementos para uma gestão inteligente dos ativos, que inclui habilidades de rastreamento, monitoramento e gerenciamento de informações sobre confiabilidade, uso e desempenho dos ativos (IBM, 2016). Por outro lado, as organizações ainda carecem de recursos de TI, arquitetura de dados, recursos humanos e prontidão cultural para conduzir as mudanças exigidas pela transformação tecnológica (BCG, 2019).

Por outro lado, para alcançar os benefícios potenciais, são exigidos altos investimentos para implementar estas tecnologias digitais nas empresas de manufatura. Além disso, a falta de conhecimento para justificar a viabilidade econômica e as incertezas relacionadas aos benefícios fornecidos são alguns dos obstáculos à introdução de tecnologias da Indústria 4.0 (Cheng *et al.*, 2018; Joppen *et al.*, 2019). Assim, um desafio recorrente para as empresas é a capacidade de avaliar o retorno dos investimentos em tecnologia nos estágios iniciais que antecedem o processo de tomada de decisão (Tan *et al.*, 2011; Häckel *et al.*, 2015; Schuh *et al.*, 2017; Cheng *et al.*, 2018; Joppen *et al.*, 2019a; Joppen *et al.*, 2019b).

O sucesso nesta transição tecnológica é altamente dependente da capacidade da organização em identificar quais dados e tecnologias são mais oportunas para o negócio, além dos desafios de atrair e reter as pessoas necessárias e garantir que a força de trabalho existente possa adquirir as novas habilidades necessárias (BCG, 2019). Diante disso, surge o desafio de garantir que a tomada de decisão seja orientada por uma base de informações adequada (Ouertani *et al.*, 2008; Macchi *et al.*, 2018; Maletič *et al.*, 2020).

Desta forma, a contribuição deste trabalho para a literatura em gestão de ativos e avaliação de investimentos consiste na estruturação de um framework para orientar a tomada de decisão de investimentos. Este framework aborda o ambiente de desenvolvimento tecnológico trazido pela Indústria 4.0 em empresas de manufatura. Além de uma abordagem exploratória sobre a gestão de ativos físicos em empresas com emprego intensivo de capitais, manufatura, esta pesquisa contempla a proposição de um framework para orientar a avaliação de investimentos em ativos da Indústria 4.0.

1.4 Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos utilizados no desenvolvimento deste trabalho podem ser detalhados em método de pesquisa e método de trabalho.

1.4.1 Método de Pesquisa

Em relação à natureza, este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, visto que busca gerar conhecimento para aplicações práticas na solução de problemas relacionados à tomada de decisão de investimentos no processo de gestão de ativos físicos. Por estar baseada em dados qualitativos e em diferentes abordagens, esta pesquisa pode ser classificada como predominantemente qualitativa quanto à abordagem do problema. Adicionalmente, o processo e seu significado são os focos principais da abordagem (Silva e Menezes, 2005; Gil, 2010).

Conforme recomendado por Emmanouilidis e Komonen (2013), em relação aos objetivos esta pesquisa caracteriza-se como exploratória (El-Akruti e Dwight, 2010), tendo como principal finalidade explicitar problemas relacionados às práticas utilizadas na gestão de ativos físicos, bem como acerca da tomada de decisão de investimentos. Desta forma, a pesquisa busca explorar a problemática em estudo de modo a permitir o desenvolvimento de uma solução adequada (Gil, 2010).

Quanto aos procedimentos utilizados, trata-se de um estudo de caso, uma vez que permite o amplo e detalhado conhecimento de um cenário prático específico (El-Akruti e Dwight, 2010). Além disso, destaca-se nas etapas iniciais desta pesquisa o emprego da Pesquisa Bibliográfica e o Estudo de Campo, por meio da aplicação de entrevistas semiestruturadas para explorar os tópicos de pesquisa (Gerhardt e Silveira, 2009; Gil, 2010).

1.4.2 Método de Trabalho

O método de trabalho empregado para o desenvolvimento desta tese é fragmentado em três artigos, além do estabelecimento inicial da problemática de pesquisa e a discussão final da aplicação da sistemática proposta, conforme apresentado na Figura 1. A primeira etapa corresponde ao projeto de pesquisa que estabelece a problemática em estudo. Esta primeira etapa apresenta o tema, os objetivos, a justificativa do tema e dos objetivos, os procedimentos, as limitações e delimitações que orientam a condução desta tese. A segunda etapa traz o primeiro

artigo, que apresenta, além da revisão da literatura, a revisão dos padrões normativos sobre gestão de ativos físicos. Este primeiro artigo também contempla um estudo de campo, conduzido por meio de entrevistas semiestruturadas com especialistas, que orientou, juntamente com a revisão da literatura, a construção de uma visão geral do processo de gestão de ativos físicos no ambiente corporativo.

Na terceira etapa é apresentado o segundo artigo. A partir da visão geral do processo de gestão de ativos fornecida pelo primeiro artigo e da revisão da literatura sobre a tomada de decisão na gestão de ativos, este artigo contempla a condução de um estudo de campo com três empresas multinacionais com emprego intensivo de ativos físicos. A partir de entrevistas semiestruturadas foi possível identificar e compreender as práticas da gestão de ativos em termos da condução do processo de tomada de decisão. Assim, o segundo artigo fornece uma visão geral da tomada de decisão ao longo do processo de gestão de ativos. Neste artigo também são discutidos os desafios e oportunidades para a gestão de ativos em termos do processo de tomada de decisão, com particular ênfase aos aspectos associados direta ou indiretamente à avaliação de investimentos.

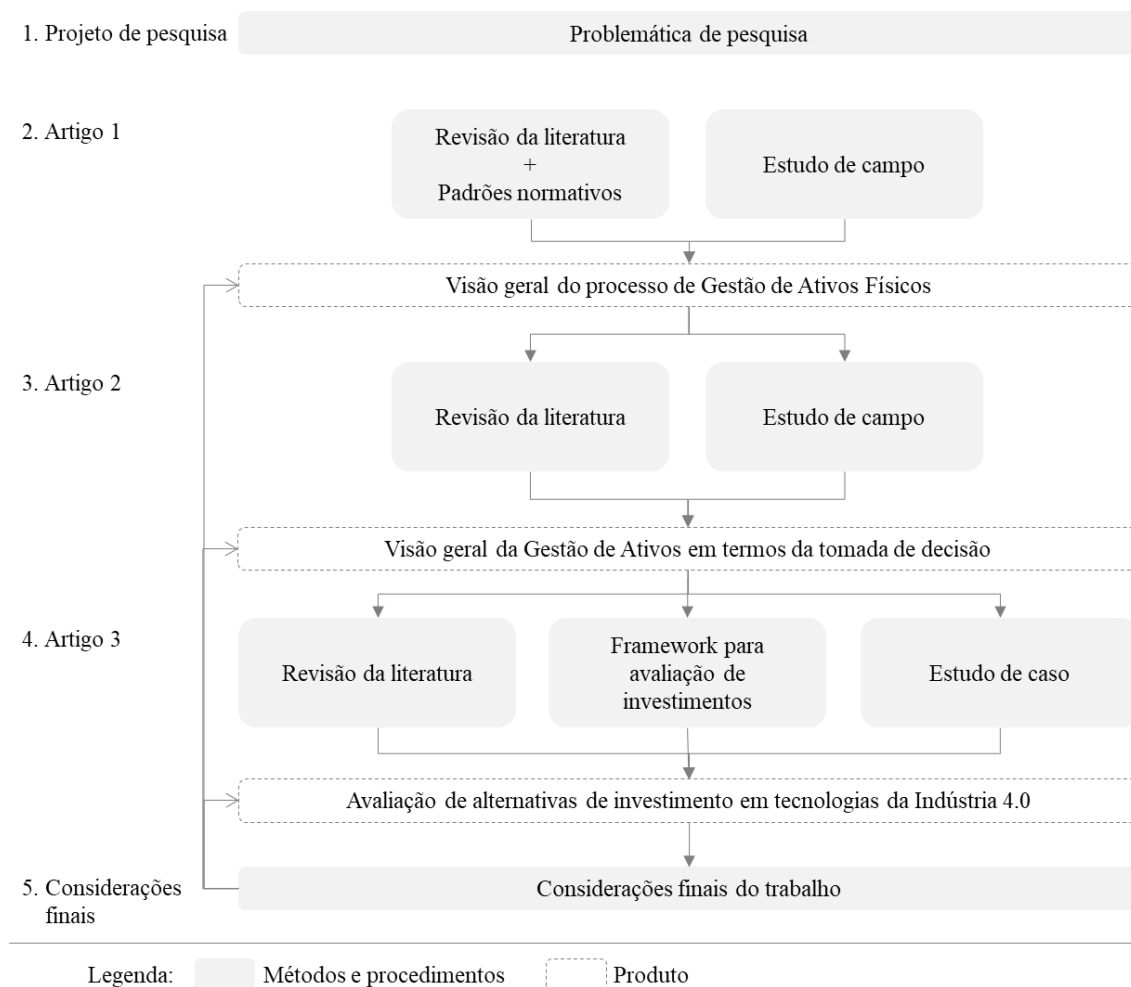


Figura 1: Método de trabalho

Fonte: Elaborado pelo autor.

O terceiro artigo, apresentado na quarta etapa, contempla a proposição de um framework para orientar a tomada de decisão de investimentos em tecnologias da Indústria 4.0. Esta sistemática surge a partir das observações resultantes do segundo artigo e da revisão da literatura sobre avaliação de investimentos em tecnologias da Indústria 4.0. Seguindo esta etapa, é conduzido um estudo de caso em uma empresa multinacional de manufatura, para validar a aplicabilidade do framework proposto. Por fim, na última etapa são apresentadas as considerações finais do trabalho.

1.5 Limitações e delimitações do estudo

A partir da abordagem acerca da gestão de ativos físicos e a tomada de decisão de investimentos em tecnologias da Indústria 4.0, o escopo desta pesquisa adota algumas delimitações, bem como apresenta algumas limitações.

Conforme verificado ao longo deste estudo, tanto a gestão de ativos quanto a avaliação de investimentos em tecnologias constituem abordagens de interesse para academia e para o ambiente de negócios. Logo, a abordagem simultânea, conforme proposto neste estudo, exige a definição de algumas delimitações. Assim, inicialmente esta pesquisa explora a literatura e padrões normativos, juntamente com um estudo caso em empresas de capital intensivo para desenvolver a compreensão do processo de gestão de ativos físicos. Do mesmo modo, na segunda etapa desta pesquisa foi realizado outro estudo de caso para explorar o fluxo de informações e o processo de tomada de decisão da gestão de ativos. Somente a partir deste entendimento da gestão de ativos e, baseado nos conhecimentos teórico e prático adquiridos na terceira etapa foi proposto um framework para orientar a tomada de decisão de investimentos em tecnologias da Indústria 4.0. Assim, o modelo aborda apenas decisões nos níveis estratégico e tático da gestão de ativos, especificamente aquelas relacionadas à decisão de investimentos em novas tecnologias, que conforme verificado ao longo da pesquisa é um tema atual e relevante para a gestão de ativos. Desse modo, outras decisões presentes no processo de gestão de ativos não são abrangidas pelo modelo.

Por outro lado, algumas limitações do estudo podem ser evidenciadas. Devido ao número restrito de empresas consultadas no estudo de campo desenvolvido nas etapas iniciais, esta pesquisa tem caráter indicativo, não podendo ser generalizada. Quanto ao ambiente de aplicação, o estudo teve como foco empresas de capital intensivo, mais especificamente empresas de manufatura. Já em termos da aplicação do modelo de avaliação de investimento em apenas uma

empresa faz com que as conclusões sejam limitadas ao ambiente em estudo, não sendo diretamente generalizáveis.

1.6 Estrutura do trabalho

Esta tese é formada por seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução, o tema e os objetivos, seguidos da justificativa destes, os procedimentos metodológicos, as limitações e delimitações desta pesquisa. O capítulo dois apresenta o primeiro artigo, que fornece uma visão geral do processo de gestão de ativos físicos, a partir da revisão da literatura, dos padrões normativos e de um estudo de campo. O capítulo três apresenta o segundo artigo, que traz uma discussão geral da gestão de ativos em termos da tomada de decisão de investimentos no contexto da Indústria 4.0. Já o capítulo quatro apresenta o terceiro artigo, que fornece um framework para avaliação de alternativas de investimentos em tecnologias da Indústria 4.0. Por fim, no quinto e último capítulo são apresentadas as considerações finais do trabalho.

1.7 Referências

Aghabegloo, M.; Rezaie, K.; Ali Torabi, S.; Yazdani, M. Integrating business impact analysis and risk assessment for physical asset criticality analysis: A framework for sustainable operations in process industries. *Expert Systems with Applications*, 241, (2024).

Alsyouf, I.; Alsuwaidi, M.; Hamdan, S.; Shamsuzzaman, M. Impact of ISO 55000 on organisational performance: Evidence from certified UAE firms. *TOTAL QUALITY MANAGEMENT & BUSINESS EXCELLENCE*, 32(1–2), 1–19, (2018).

Amadi-Echendu, J.; Willett, R.; Brown, K.; Lee, J.; Mathew, J.; Vyas, N.; Yang, B. What is Engineering Asset Management? In *Proceedings 2nd World Congress on Engineering Asset Management and the 4th International Conference on Condition Monitoring*, pages pp. 116-129, Harrogate, United Kingdom, (2007).

Backman, J.; Helaakoski, H. Evaluation of Internet-of-Things Platforms for Asset Management. Springer International Publishing Switzerland 2016 K.T. Koskinen et al. (eds.), *Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2015)*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, (2016): DOI 10.1007/978-3-319-27064-7_9

BCG, 2019. *GLOBAL ASSET MANAGEMENT 2019. Will These '20s Roar?* Boston Consulting Group (BCG), July, (2019).

Borek, A.; Parlikad, A. K., Woodall, P.; Tomasella, M. “A Risk Based Model for Quantifying the Impact of Information Quality.” *Computers in Industry* 65 (2): 354–66, (2014).

- Braaksma, A. J. J.; Veldman, J. Service and Life Cycle Management of engineered assets/goods. *Computers & Industrial Engineering*, 76, Pages 387-389, (2014).
- Brous, P.; Janssen, M.; Herder, P. Internet of Things adoption for reconfiguring decision-making processes in asset management. *Business Process Management Journal*, (2018): <https://doi.org/10.1108/BPMJ-11-2017-0328>
- Brown, R. E.; Humphrey, B. G. Asset Management for Transmission and Distribution. *IEEE power & energy magazine*, (2005).
- Candón, E.; Martínez-Galán, P.; De la Fuente, A.; González-Prida, V.; Crespo Márquez, A.; Gómez, J.; Sola, A.; Macchi, M. Implementing Intelligent Asset Management Systems (IAMS) within an Industry 4.0 Manufacturing Environment. *IFAC PapersOnLine*, 52(13), 2488–2493, (2019).
- Cheng, Y.; Matthiesen, R.; Farooq, S.; Johansen, J.; Hua, H.; Mac, L. The evolution of investment patterns on advanced manufacturing technology (AMT) in manufacturing operations: A longitudinal analysis. *International Journal of Production Economics* 203, 239-253, (2018).
- Dalenogare, L. S.; Benitez, G. B.; Ayala, N. F.; Frank, A. G. The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics* 204, 383-394, (2018).
- Dalmarco, G.; Ramalho, F. R.; Barros, A. C.; Soares, A. L. Providing industry 4.0 technologies: The case of a production technology cluster. *Journal of High Technology Management Research*, 100355, (2019).
- El-Akruti, K. O. The strategic role of engineering asset management in capital intensive organisations. Doctor of Philosophy thesis. School of Mechanical, Materials and Mechatronic Engineering, University of Wollongong. Austrália, (2012).
- El-Akruti, K.; Dwight, R. "A framework for the engineering asset management system", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 19 Issue: 4, pp.398-412, (2013).
- El-Akruti, K.; Dwight, R. Research methodologies for engineering asset management. In *ACSPRI Social Science Methology Conference 2010*. Sydney, Australia, (2010).
- El-Akruti, K.; Dwight, R.; Zhang, T. The strategic role of engineering asset management. *International Journal of Production Economics*, 146 (1), 227-239, (2013).
- Emmanouilidis, C.; Komonen, K. Physical Asset Management Practices in Industry: Comparisons between Greece and Other EU Countries. *Advances in Production Management Systems, Apms, Pt Ii*, 415, pp. 509–516, (2013).
- Gerhardt, T. E.; Silveira, D. T. Métodos de pesquisa - Coordenado pela Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. – Porto Alegre: Editora da UFRGS, (2009).
- Ghobakhloo, M. Determinants of information and digital technology implementation for smart manufacturing, *International Journal of Production Research*, (2019).
- Gil, Antônio Carlos. *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*. 5. ed. São Paulo: Atlas, (2010).

Greco, M.; Cricelli, L.; Grimaldi, M. A strategic management framework of tangible and intangible assets. *European Management Journal*, v. 31, pp. 55-66, (2013).

Häckel, B.; Isakovic, V.; Moser, F. Integrated long- and short- term valuation of IT innovation investments. *F. Electronic Markets*, 25: 73, (2015).

Hampapur, A.; Cao, H.; Davenport, A.; Dong, W. S.; Fenhagen, D.; Feris, R. S.; Goldszmidt, G.; Jiang, Z. B.; Kalagnanam, J.; Kumar, T.; Li, H.; Liu, X.; Mahatma, S.; Pankanti, S.; Pelleg, D.; Sun, W.; Taylor, M.; Tian, C. H.; Wasserkrug, S.; Xie, L.; Lodhi, M.; Kiely, C.; Butturff, K.; Desjardins, L. Analytics-driven asset management. *IBM J. Res. & Dev.* Vol. 55 No. 1&2 Paper 13 January/march (2011), DOI: 10.1147/JRD.2010.2092173

Hastings, N. A. J. *Physical Asset Management*. Springer London Dordrecht Heidelberg New York, (2010).

Heitz, C.; Goren, L.; Sigrist, J. Decision Making in Asset Management: Optimal Allocation of Resources for Maximizing Value Realization. *Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2015)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 259-268, (2016).

Hipkin, I. Knowledge and IS implementation: case studies in physical asset management. *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 21 Iss 10 pp. 1358 – 1380, (2001).

IBM, (2016). Understanding the impact and value of enterprise asset management. IBM Watson IoT for Asset Management helps you make smarter decisions about your assets by combining the world-class power of IBM Maximo software with IoT data and cognitive computing. © Copyright IBM Corporation 2016 IBM Global Business Services, Produced in the United States of America, August (2016).

ISO 55000. *Asset Management: Overview, principles and terminology*. International Organization for Standardization. Geneva, (2014).

ISO 55001. *Asset Management: Management systems-requirements*. International Organization for Standardization. Geneva, (2014).

ISO 55002. *Asset Management: Management systems-Guidelines for the application of ISO 55001*. International Organization for Standardization. Geneva, (2014).

Joppen, R.; Kühn, A.; Hupach, D.; Dumitrescu, R. Collecting data in the assessment of investments within production. *Procedia CIRP Volume 79*, Pages 466-471, (2019a).

Joppen, R.; Lipsmeier, A.; Tewes, C.; Kühn, A.; Dumitrescu, R. Evaluation of investments in the digitalization of a production. *Procedia CIRP Volume 81*, Pages 411-416, (2019b).

Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J. *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0*. Final report of the Industrie 4.0 WG, (2013).

Kamble S. S.; Gunasekaran, A.; Sharma, R. Analysis of the driving and dependence power of barriers to adopt industry 4.0 in Indian manufacturing industry. *Computers in Industry*, 101, 107-119, (2018).

Kans, M.; Galar, D. The Impact of Maintenance 4.0 and Big Data Analytics within Strategic Asset Management Mirka - MPMM 2016: Maintenance Performance Measurement & Management. In 6th International Conference on Maintenance Performance Measurement and Management, (2016).

Koukias, A.; Kiritsis, D. Rule-based Mechanism to Optimize Asset Management Using a Technical Documentation Ontology. IFAC-Papers OnLine, v. 48-3, pp. 1001-1006, (2015).

Liao, Y.; Deschamps, F.; Loures, E. de F. R.; Ramos, L. F. P. Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal, International Journal of Production Research, (2017).

Macchi, M.; Roda, I.; Negri, E.; Fumagalli, L. Exploring the role of Digital Twin for Asset Lifecycle Management. IFAC PapersOnLine 51-11, 790-795, (2018).

Maletič, D.; Maletič, M.; Al-Najjar, B.; Gomišček, B. An Analysis of Physical Asset Management Core Practices and Their Influence on Operational Performance. SUSTAINABILITY, 12 (21), 9097, (2020).

Maletič, D.; Maletič, M.; Al-Najjar, B.; Gotzamani, K.; Gianni, M.; Kalinowski, T. B.; Gomišček, B. Contingency Factors Influencing Implementation of Physical Asset Management Practices. Organizacija, De Gruyter Open, v. 50, Number 1, February, (2017). DOI: 10.1515/orga-2017-0003

Marquez, A. C.; Fernandez, J. F. G.; Fernández, P. M.-G.; Lopez, A. G. Maintenance Management through Intelligent Asset Management Platforms (IAMP). Emerging Factors, Key Impact Areas and Data Models. Energies, 13(July), 3762, (2020).

Mckeown, D. UK leading the way with new standard. Asset Management & Maintenance. p. 7, may, (2014).

Mitchell, J. S. Asset Management Handbook. Fourth Edition, August 2006. (446 páginas, Clarion Technical Pub; Edição: 4 (1 de dezembro de 2006), ISBN-10: 0971794545, ISBN-13: 978-0971794542

Msongole, S. S.; Bakuwa, R. C.; Mkandawire, B. O. B. Assessing the level of application of physical asset management core practices at water boards in Malawi. Heliyon, 8(11), e11614, (2022).

Ouertani, M. Z.; Parlikad, A. K.; Mcfarlane, D. Asset information management: Research challenges. 2008 Second International Conference on Research Challenges in Information Science. Marrakech, Morocco, Inst. of Elec. and Elec. Eng. (IEEE), pp. 361-370, (2008).

Petchrompo, S.; Parlikad, A. K. A review of asset management literature on multi-asset systems. Reliability Engineering and System Safety, 181, 181-201, (2019).

Porter, M. E. The Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance. New York: Free Press, 1985. (Republished with a new introduction, 1998.) ISBN 0-684-84146-0

Porter, M., Heppelmann, J. How smart, connected products are transforming competition. Harv. Bus. Rev. 92, 64-88, (2014).

Qiu, X.; Luo, H.; Xu, G.; Zhong, R.; Huang, G. Q. Physical assets and service sharing for IoT-enabled Supply Hub in Industrial Park (SHIP). *Int. J. Production Economics*, v. 159, pp. 4-15, (2015).

Roda, I.; Garetti, M. TCO Evaluation in Physical Asset Management: Benefits and Limitations for Industrial Adoption. Conference: IFIP WG 5.7 International Conference on Advances in Production Management Systems, v. 440, pp. 216-223, (2014).

Roda, I.; Macchi, M. Studying the funding principles for integrating Asset Management in Operations: an empirical research in production companies. *IFAC-PapersOnLine*, v. 49-28, pp. 01-06, (2016).

Schuh, G., Anderi, R., Gausemeier, J., 2017. *Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies (acatech Study)*.

Schuman, Charles A.; Brent, Alan C. "Asset life cycle management: towards improving physical asset performance in the process industry", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 25 Iss 6 pp. 566 – 579, (2005).

Silva, E. L.; Menezes, E. M. *Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação*. 4. ed. Florianópolis: UFSC, (2005).

Spüntrup, F.; Insländ, L. Asset fleet management in the process industry – a conceptual model. *IFAC PapersOnLine* 51-18, 281-286, (2018).

Tan, K. H.; Noble, J.; Sato Y.; Tse, Y. K. A marginal analysis guided technology evaluation and selection. *International Journal of Production Economics* Volume 131, Issue 1, Pages 15-21, May, (2011).

Taylor, W. B. The Use of Life Cycle Costing in Acquiring Physical Assets. *Long Range Planning*, v. 14, n. 6, pp. 32-43, (1981).

2 ARTIGO 1 - Framework para gestão de ativos físicos em empresas de manufatura no contexto da indústria 4.0

Rodrigo Pessotto Almeida
Ricardo Gonçalves de Faria Corrêa
Francisco José Kliemann Neto

Resumo

Objetivo - O objetivo deste artigo é analisar as práticas atuais de Gestão de Ativos (GA) e, com base na revisão da literatura e padrões normativos, desenvolver um framework para gestão de ativos físicos para empresas de manufatura.

Design / metodologia / abordagem - Este artigo apresenta uma abordagem baseada na Design Science Research (DSR) e entrevistas semiestruturadas com especialistas e profissionais para orientar e avaliar o desenvolvimento do framework proposto.

Conclusões - Os resultados mostram que os processos e práticas atualmente empregadas pelas empresas de manufatura para gerenciar seus ativos são limitadas quando considerada a relevância da GA no desempenho dessas empresas. Este estudo propõe um framework para a gestão de ativos físicos. O framework foi avaliado por três empresas multinacionais com intensiva utilização de ativos físicos. Finalmente, a discussão aborda como a Indústria 4.0 pode apoiar e fomentar o processo de GA.

Limitações / implicações da pesquisa - O estudo se limita a analisar as práticas atuais e as mudanças necessárias para o processo de gestão de ativos físicos em empresas de manufatura e deve ser transferido para outras indústrias.

Implicações práticas - Este artigo fornece suporte para os gerentes de empresas de manufatura para melhorarem os processos e resultados organizacionais por meio da adoção de processos de gerenciamento de ativos físicos.

Originalidade / valor - Este trabalho é um dos primeiros estudos a investigar as práticas atuais e a propor um framework para gestão de ativos físicos em empresas de manufatura. Além disso, este estudo explora os benefícios e oportunidades da indústria 4.0 para o processo de GA.

Palavras-chave: Gestão de ativos, Gestão de ativos físicos, Empresas de manufatura, ISO 55000.

Abstract

Purpose - The purpose of this paper is to analyze current Asset Management (AM) practices and based on the literature review, to develop a framework for physical AM in the context of manufacturing companies.

Design/methodology/approach - This paper presents an approach based on the Design Science Research Methodology and semi-structured interviews with experts and practitioners to guide and assess the development of the proposed framework.

Findings - The results show that the processes and practices currently employed by manufacturing companies to manage their assets are limited when considered the relevance of AM on companies' performance. This study proposes a framework for physical AM. The framework was assessed by three multinational asset-intensive companies. Finally, the discussion addresses how Industry 4.0 can support and foster AM process.

Research limitations/implications - The study is limited to analyzing the current practices and changes required for the physical AM process in manufacturing companies and should be transferred to other industries.

Practical implications - This paper provides support for managers to improve organizational processes and results through the adoption of appropriate physical AM processes in manufacturing companies.

Originality/value - This work is one of the first studies to investigate the current practices and to propose a framework for physical AM in manufacturing companies. Additionally, this study explores industry 4.0 benefits and opportunities for the AM process.

Keywords: Asset management, Physical asset management, Manufacturing companies, ISO 55000.

2.1 Introdução

Indústrias com emprego intensivo de ativos, como a indústria de manufatura, são desafiadas a maximizar o valor fornecido por esses ativos ao longo de seu ciclo de vida (Aghabegloo *et al.*, 2024; IBM, 2019). Essas empresas devem monitorar, avaliar e gerenciar continuamente a confiabilidade de uma ampla gama de ativos físicos, tecnológicos e humanos (IBM, 2019). Outro desafio para as empresas de manufatura são as transformações tecnológicas advindas da Internet das Coisas Industrial (IIoT) nos últimos anos, proporcionando novas oportunidades para melhorar o desempenho operacional dos ativos industriais (Maletič *et al.*, 2020; Brous *et al.*, 2018). Nesse contexto, a implantação de práticas de GA visa garantir a otimização do uso desses recursos e contribuir para a melhoria do desempenho operacional da organização (Brous *et al.*, 2018; Maletič *et al.*, 2017; Roda e Garetti, 2014).

De acordo com o padrão normativo ISO 55000: 2014, um ativo fornece valor real ou potencial para uma organização. Ativos podem ser pessoas, equipamentos, estoque, dados, marca, contratos, dinheiro, entre outros, que agregam valor de diversas formas, como retorno financeiro, nível de serviço e satisfação do cliente (ISO 55000: 2014; Hastings, 2010; PAS 55: 2008). De acordo com a *Publicly Available Specification* (PAS) 55: 2008, ativos físicos, máquinas e edifícios, por exemplo, representam apenas uma das categorias de ativos que devem ser gerenciados de forma holística para atingir os objetivos da organização.

Para Msongole *et al.* (2022), Koukias e Kiritsis (2015), e El-Akruti *et al.* (2013), mesmo em empresas intensivas em ativos, empresas de capital intensivo, existe uma percepção inadequada da relevância do processo de GA na configuração e implementação da estratégia organizacional. Para esses autores, as atividades de GA e seus relacionamentos ainda não são suficientemente controlados, o que requer maior integração no contexto organizacional. Além disso, a GA pode ser melhorada por meio de uma abordagem abrangente e integrada (Maletič *et al.*, 2020; Qiu *et al.*, 2015; El-Akruti *et al.*, 2013; Hastings, 2010). Nesse sentido, Petchrompo e Parlikad (2019), Alsyouf *et al.* (2018) e Roda e Garetti (2014) enfatizam a necessidade de abordagens que integrem a gestão estratégica de ativos físicos com sistemas baseados nos padrões normativos da série ISO 55000, para dar suporte à organização moderna.

Mesmo com a adoção das normas ISO 55000, as organizações ainda devem tomar decisões para desenvolver seu processo de GA, que deve estar alinhado com os objetivos estratégicos (Brous *et al.*, 2018; Ruitenburt e Braaksma, 2017). Nesse sentido, a GA traduz os objetivos organizacionais em decisões, planos e atividades financeiras e técnicas (Alsyouf *et al.*,

2018; Hastings, 2010). Assim, cada organização deve estabelecer como essa integração ocorrerá, dependendo do seu planejamento estratégico, do contexto operacional e das diretrizes financeiras especificamente adotadas. Para Msongole *et al.* (2022), Ruitenburg e Braaksma (2017), e Heitz *et al.* (2016), GA é a aquisição de valor dos ativos físicos, no entanto, métodos formais para esse fim ainda não foram desenvolvidos.

Por outro lado, a implementação das melhores práticas em gestão de ativos físicos na indústria ainda não está suficientemente relatada na literatura (Maletič *et al.*, 2020; Heitz *et al.*, 2016; El-Akruti *et al.*, 2013). Conforme destacado por El-Akruti *et al.* (2013), vários modelos foram desenvolvidos com base nas experiências, entendimentos pessoais e práticas de organizações específicas. No entanto, esses autores observam que tais modelos não são baseados na literatura existente, o que levanta questões sobre a validade destes para a pesquisa acadêmica. El-Akruti *et al.* (2013) e Msongole *et al.* (2022) destacam que a colaboração entre organizações e pesquisadores acadêmicos está possibilitando a ampliação do conhecimento nesta área.

Assim, com base na revisão da literatura, na opinião de especialistas e em dados empíricos coletados do estudo de caso, este artigo propõe um framework para a gestão de ativos físicos em empresas de manufatura. Quatro especialistas foram entrevistados durante a fase de desenvolvimento do framework. Para avaliar o framework proposto, os estudos de caso foram realizados por meio de entrevistas com seis profissionais de empresas multinacionais de capital intensivo, sendo dois entrevistados de cada empresa. Com base nos resultados obtidos, este estudo estende a análise para discutir as oportunidades e benefícios das tecnologias da Indústria 4.0 no apoio à implementação do processo de GA.

2.2 Fundamentação teórica

2.2.1 Gestão de ativos físicos

Conforme o padrão normativo ISO 55000 (2014), a GA pode ser definida como a atividade coordenada de uma organização para gerar valor a partir de seus ativos (IAM). Para Aghabegloo *et al.* (2024), Alsyouf *et al.* (2018), e Hastings (2010), a função da GA é fornecer recursos e conhecimentos para apoiar a aquisição, o suporte em serviço e a disposição dos ativos físicos necessários para a operacionalização das estratégias da organização. Deste modo, a GA tem se mostrado relevante para indústrias de capital intensivo como, por exemplo, óleo e gás, manufatura ou transporte como função de suporte à maximização do valor fornecido pela estrutura de ativos físicos destas organizações (Msongole *et al.*, 2022; IBM, 2016; Hastings, 2010).

Diante disso, as próximas subseções exploram o surgimento da GA, seguido do desdobramento desta função a partir do sistema de gestão de ativos. Posteriormente é apresentada a abordagem do ciclo de vida dos ativos, e por fim são abordadas as questões relacionadas à inserção da GA no contexto organizacional.

2.2.2 Surgimento da Gestão de Ativos

Historicamente a gestão de ativos físicos tem sido tratada como uma abordagem técnica de engenharia, com foco predominante em atividades discretas como confiabilidade e manutenção de ativos (De la Fuente *et al.*, 2018; El-Akruti *et al.*, 2013; Hastings, 2010; Frolov *et al.*, 2009). Embora seja relativamente recente a abordagem de gestão de ativos físicos como uma função de gestão (Candón *et al.*, 2019; El-Akruti *et al.*, 2013; Emmanouilidis e Komonen, 2013), a preocupação com o desempenho destes ativos é de longa data, como por exemplo, Taylor (1981) que aborda as necessidades de ações de GA tanto na iniciativa privada quanto pública.

A criação, no ano de 1994, do *Institute of Asset Management* (IAM) foi o ponto de partida para compartilhar e difundir boas práticas de gestão de ativos físicos nas organizações. Como resultado, no ano de 2004 foi publicada a primeira *Publicly Available Specification* (BSI PAS 55), que se tornou o padrão global na década seguinte e que define requisitos fundamentais para a gestão otimizada de ativos físicos (IAM). Com base no sucesso da PAS 55, em janeiro de 2014 a *International Standards Organization* (ISO) lançou os padrões de gestão de ativos da série ISO 55000, que orientam o desenvolvimento do sistema de GA (IBM, 2019). Com base na direção desses padrões, as organizações podem estabelecer um sistema de GA que apoie a gestão de riscos, custos e desempenho associados a seus ativos físicos (Petchrompo e Parlikad, 2019; Maletič *et al.*, 2017; Hastings, 2010).

2.2.3 Sistema de Gestão de Ativos

O Sistema de Gestão de Ativos é um conjunto de elementos inter-relacionados e interativos de uma organização que estabelece políticas e objetivos, bem como o processo necessário para atingir esses objetivos (Aghabegloo *et al.*, 2024; Maletič *et al.*, 2017; ISO 55000, 2014). Assim, o sistema de gestão de ativos é formado por elementos que podem ser definidos como um conjunto de ferramentas que inclui políticas, planos, operações, desenvolvimento de

competências e sistemas de informação, os quais são integrados para apoiar a GA (Petchrompo e Parlikad, 2019; Hastings, 2010). A relação entre os componentes de um sistema de gestão de ativos inseridos no contexto organizacional é ilustrada na Figura 1, conforme proposto pela ISO 55000.

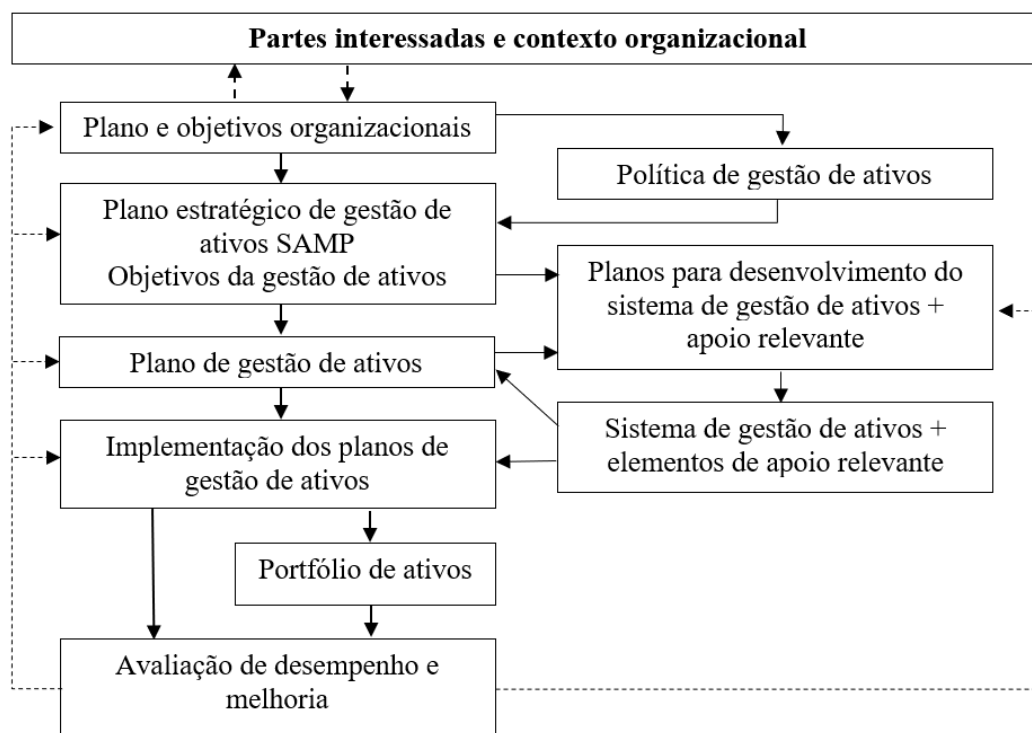


Figura 1: Relações entre os elementos de um sistema de gestão de ativos
 Fonte: Adaptado de ISO 55000:2014.

Do mesmo modo, o *Asset Management Council* (AMC) publicou o AMBoK (2014) 2ª edição, que busca estabelecer uma linguagem comum para a área de GA. O AMBoK (2014) apresenta uma coleção de modelos, definições e abordagens visando consolidar os conhecimentos nesta área. Este guia atua como suporte à operacionalização da série de normas ISO 55000, ampliando a abordagem acerca das partes interessadas envolvidas na GA (AMC).

Conforme já destacado, embora a abordagem da gestão de ativos físicos como uma função gerencial seja relativamente recente (Maletič *et al.*, 2020; Alabdulkarim *et al.*, 2015; El-Akruti *et al.*, 2013), a preocupação com o desempenho dos ativos é antiga. Segundo Taylor (1981), na iniciativa privada, onde os lucros são o objetivo principal, ações para otimizar os custos ao longo do ciclo de vida de um ativo físico parecem contribuir para a maximização dos lucros. Já, no setor público, onde a demanda por serviços é quase inesgotável, o autor destaca que encontrar meios de aumentar o nível de serviço com o uso de menos recursos pode ser interessante. Essas afirmações confirmam a necessidade de ações para otimizar as atividades do ciclo de vida dos ativos físicos (Maletič *et al.*, 2020; Roda e Garetti, 2014; Shuman e Brent, 2005).

Juntamente com a consolidação de padrões normativos, diversas contribuições são encontradas na literatura sobre gestão de ativos. Estas constituem abordagens discretas dentro do contexto da gestão de ativos explorando tópicos como otimização de investimentos, planejamento da sustentabilidade, desempenho, otimização de custo e risco, e atividades do ciclo de vida dos ativos (Maletič *et al.*, 2020; Roda e Garetti 2014; Ruitenburga *et al.*, 2014; Ouertani *et al.*, 2008; Schuman e Brent, 2005). Embora a abordagem atual enfatize o ciclo de vida dos ativos, um sistema de gestão de ativos possui natureza multidisciplinar e colaborativa (Aghabegloo *et al.*, 2024; Ruitenburg e Braaksma, 2017; El-Akruti *et al.*, 2013).

2.2.4 O ciclo de vida dos ativos

A vida de um ativo é definida como o período que abrange desde sua criação até o final da vida do ativo (Schuman e Brent, 2005). Já o ciclo de vida pode ser compreendido como todos os estágios envolvidos na gestão de um ativo, onde a designação e o número de estágios são definidos pela própria organização (ISO 55000:2014).

Diversos estudos apresentam abordagens sobre o ciclo de vida dos ativos (Aghabegloo *et al.*, 2024; Maletič *et al.*, 2020; El-Akruti e Dwight, 2013; El-Akruti, 2012; Ouertani *et al.*, 2008; Schuman e Brent, 2005; Taylor, 1981). Porém, a literatura apresenta abordagens de GA que se limitam aos aspectos iniciais da fase de utilização, o que significa que as demais fases do ciclo de vida do ativo são de certa forma negligenciadas (El-Akruti e Dwight, 2013; El-Akruti, 2012; Schuman e Brent, 2005). Mesmo assim, principalmente nos estágios iniciais do ciclo de vida onde são tomadas decisões estratégicas que incluem a inserção de novos ativos, se torna indispensável a adoção simultânea das perspectivas técnica e financeira para orientar a tomada de decisão acerca dos ativos (Maletič *et al.*, 2020; Braaksma e Veldman, 2014; Hastings, 2010).

A limitação de abordagens ampliadas para a gestão do ciclo de vida do ativo, baseadas principalmente em modelos discretos e operacionais, ocasiona a condução de análises frágeis nas fases iniciais do projeto de determinada solução de ativos (Maletič *et al.*, 2020). Porém, essas fases são responsáveis pela fixação da maior parcela de todos os custos do ciclo de vida (*Life cycle costing - LCC*) do ativo (Maletič *et al.*, 2020; El-Akruti *et al.*, 2013; El-Akruti, 2012; Schuman e Brent, 2005).

Desta forma, os custos ao longo de todo o ciclo de vida dos ativos muitas vezes não são adequadamente gerenciados (El-Akruti, 2012; Schuman e Brent, 2005). Porém, esta deficiência tem sido assinalada na literatura a partir do conceito de Terotecnologia, que consiste na integração

das diversas disciplinas envolvidas ao longo de todo o ciclo de vida do ativo físico na busca pelo custo do ciclo de vida econômico (Schuman e Brent, 2005; Taylor, 1981).

Neste sentido, verifica-se relevante o emprego de análises robustas nos estágios iniciais da vida dos ativos para fornecer suporte à tomada de decisão como, por exemplo, selecionar, desenvolver e implantar ativos (El-Akruti, 2012). De forma geral, a coordenação entre os estágios que formam o ciclo de vida é fundamental para a efetividade da GA (El-Akruti, 2012; Ouertani *et al.*, 2008).

Igualmente, a obtenção do máximo valor potencial dos ativos está necessariamente relacionada ao fato da GA contemplar todas as fases do ciclo de vida (Maletič *et al.*, 2020; Ruitenburg e Braaksma, 2017; Braaksma e Veldman, 2014; El-Akruti e Dwight, 2013; El-Akruti, 2012; Ouertani *et al.*, 2008; Schuman e Brent, 2005).

Um sistema de gestão de ativos possui potencial significativo de influenciar todas as atividades do ciclo de vida dos ativos, promovendo impactos positivos sobre o custo, produtividade, qualidade, segurança, sustentabilidade ambiental, resultados do negócio, e alcance das estratégias (Aghabegloo *et al.*, 2024; Alsyouf *et al.*, 2018; Koukias e Kiritsis, 2015; El-Akruti *et al.*, 2013; Emmanouilidis e Komonen, 2013). Porém, pouco tem sido feito na literatura para relacionar a gestão de ativos com a estratégia e o contexto organizacional (Msongole *et al.*, 2022; El-Akruti *et al.*, 2013; El-Akruti, 2012). Funções de negócios como vendas, operações e finanças são claramente representadas na estrutura da organização, enquanto o relacionamento da função de GA no contexto organizacional pode não ser tão clara assim (Aghabegloo *et al.*, 2024; Hastings, 2010).

2.2.5 Gestão de ativos no contexto organizacional

Para Maletič *et al.* (2020) e El-Akruti *et al.* (2013), a literatura aponta a necessidade de uma visão abrangente para o sistema de gestão de ativos que ainda precisa ser desenvolvida. Neste sentido, os autores apresentam uma estrutura de gestão de ativos que fornece uma abordagem holística, explorando o papel da GA no desenvolvimento e implementação da estratégia da organização. A ideia proposta pelos autores, conforme apresentado na Figura 2, é de um sistema de gestão de ativos como um conjunto de atividades de planejamento e controle colaborativo, nos níveis estratégico, tático e operacional, que ocorrem de forma integrada dentro de uma organização.

Conforme a ISO 55000, Aghabegloo *et al.* (2024), Ruitenburg e Braaksma (2017), e El-Akruti *et al.* (2013), soluções de ativos são desenvolvidas no sentido de atender às necessidades estratégicas do negócio. Assim, a partir da identificação do evento estratégico ocorre a definição da solução de ativos e sua provisão, determinando o desempenho dos ativos e os resultados relacionados à estratégia. Para a solução de ativos desempenhar suas funções são conduzidas além de atividades do ciclo de vida do ativo, diversas atividades de apoio. O gerenciamento de todas estas atividades ocorre a partir da estrutura de controle da GA, nos níveis estratégico, tático e operacional, onde são desenvolvidas as estratégias, políticas, planos e controles (Kans e Galar, 2016; El-Akruti *et al.*, 2013).

Do mesmo modo, a GA deve garantir que mudanças nos requisitos de negócio sejam acompanhadas pela estrutura de ativos físicos de forma otimizada, contemplando todos os aspectos do ciclo de vida do ativo (Maletič *et al.*, 2020; Ruitenburg e Braaksma, 2017). No atual ambiente de negócios, a gestão de ativos físicos é um desafio para as organizações e adquiriu relevante importância como função de gestão (Maletič *et al.*, 2020; Brous *et al.*, 2018; Maletič *et al.*, 2017; Ruitenburg e Braaksma, 2017).

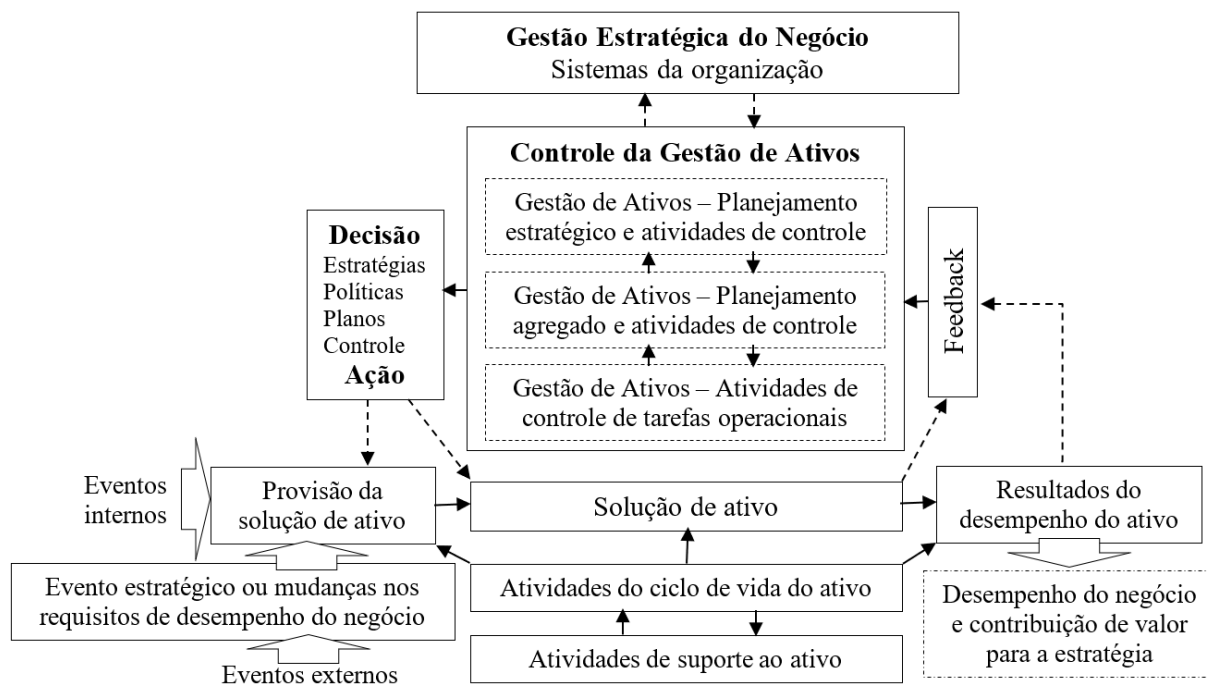


Figura 2: Relacionamento dos elementos de um sistema de gestão de ativos no contexto organizacional. Fonte: Adaptado de El-Akruti *et al.* (2013).

Por outro lado, a implementação das melhores práticas de gestão de ativos físicos na indústria não está suficientemente registrada na literatura (Aghabegloo *et al.*, 2024; Heitz *et al.*, 2016; El-Akruti *et al.*, 2013; Emmanouilidis e Komonen, 2013). Conforme destacado por El-Akruti *et al.* (2013), diversos modelos foram desenvolvidos a partir de experiências,

entendimentos pessoais e práticas de algumas organizações específicas. Porém, estes autores observam que tais modelos não estão baseados na literatura existente, o que gera alguns questionamentos acerca da validade destes para utilização em pesquisas acadêmicas. Já a colaboração entre organizações e pesquisadores acadêmicos está permitindo a ampliação do conhecimento nesta área (Msongole *et al.*, 2022; El-Akruti *et al.*, 2013; Frolov *et al.*, 2009).

Aplicações de gestão de ativos físicos em indústrias de processos frequentemente apresentam uma abordagem predominantemente operacional a partir da utilização de ferramentas como *Total Productive Maintenance* (TPM), *Reliability Centred Maintenance* (RCM), *Business Centred Maintenance* (BCM) (El-Akruti *et al.*, 2013; El-Akruti, 2012; Schuman e Brent, 2005; Hoskins *et al.*, 1998; Kelly, 1997; Campbell, 1995).

Conforme Maletič *et al.* (2020), De la Fuente *et al.* (2018), Heitz *et al.* (2016) e Roda e Macchi (2016), o aumento recente na discussão do tema gestão de ativos está relacionado com a publicação da série de normas ISO 55000. Acrescenta-se também os estudos desenvolvidos por El-Akruti *et al.* (2013), El-Akruti e Dwight (2013), e El-Akruti (2012) que abordam o relacionamento entre a gestão de ativos e a estratégia organizacional.

Segundo Aghabegloo *et al.* (2024) e Heitz *et al.* (2016), modelos para gestão de ativos físicos ainda precisam ser desenvolvidos. Neste sentido, os autores apresentam um modelo formal para a tomada de decisão na gestão de ativos físicos baseado na ISO 55000. Sob o aspecto de otimização de custos, Roda e Garetti (2014) avaliam os benefícios e limitações da adoção de técnicas de *Total Cost of Ownership* (TCO), ou custo total da posse, na gestão de ativos. Como resultados, apresentam as principais aplicações e benefícios da utilização da TCO para avaliação de ativos industriais.

Com o objetivo de otimizar estratégias de gestão de ativos, Mirzaei *et al.* (2015) apresenta uma metodologia baseada na gestão de riscos e padrões de desempenho aplicados a um sistema de iluminação pública. Do mesmo modo, González-Prida e Márquez (2012) investigam a adoção de metodologias reconhecidas na literatura para assegurar a qualidade dos processos por meio da confiabilidade no desempenho de ativos, como mecanismo de apoio à gestão de pós-vendas.

Já Qiu *et al.* (2015) apresentam uma proposta para otimizar a utilização de ativos físicos através do compartilhamento destes em parques industriais. Visando a eficácia e eficiência, a proposta utiliza *Internet of Things* (IoT) e *IoT-enabled Supply Hub in Industrial Park* (SHIP) para capturar em tempo real a interação entre as diferentes empresas participantes.

Um sistema inteligente de gerenciamento de ativos de engenharia para manutenção de transformadores de potência é apresentado por Trappey *et al.* (2015). Esse sistema realiza o monitoramento em tempo real dos principais parâmetros, utilizando modelos de mineração de dados e de previsão de falha para detectar a falha potencial dos transformadores em diversas condições de operação.

Greco *et al.* (2013) apresentam uma metodologia que auxilia as empresas a estabelecerem um ranking de seus ativos de acordo com a capacidade destes em sustentar suas vantagens competitivas, bem como um comparativo desta capacidade com os investimentos aplicados nos ativos. Uma investigação sobre abordagens atuais aplicadas na avaliação de projetos de modernização na indústria de energia e das técnicas empregadas para a gestão de ativos é conduzida por Valitov *et al.* (2015).

Em relação a desempenho, Koukias e Kiritsis (2015) apresentam mecanismos para identificar e corrigir divergências no uso de ativos a partir de instruções técnicas e documentais para melhorar ou mesmo otimizar o desempenho destes ativos. Já Ruitenburg e Braaksma (2017) abordam os impactos no potencial de fornecimento de valor pelos ativos, provocado por mudanças nos ambientes operacional e de negócio das organizações.

Diversas são as abordagens da literatura acerca da GA. Já no ambiente organizacional, empresas modernas estão frequentemente buscando por oportunidades de melhorar a utilização de seus ativos físicos de forma a obterem maior competitividade e aumentar suas receitas. No entanto, estas organizações muitas vezes possuem baixa compreensão de seus ativos, o que pode limitar as ações de otimização do ciclo de vida dos ativos (Ruitenburg e Braaksma, 2017; Koukias e Kiritsis, 2015; El-Akruti *et al.*, 2013).

Além do desafio de aumentar a formalização dos conhecimentos da gestão de ativos físicos na literatura (Heitz *et al.*, 2016; El-Akruti *et al.*, 2013; Emmanouilidis e Komonen, 2013), outros aspectos podem ser observados a partir da revisão da literatura. Um deles constitui a adoção de uma abordagem multidisciplinar para o processo de tomada de decisão da GA, que deve abordar simultaneamente aspectos técnicos, financeiros e econômicos (Braaksma e Veldman, 2014; Hastings, 2010). Por outro lado, a falta de sistemáticas para apoiar a integração e a implementação do processo de gestão de ativos também representa desafios tanto para a academia quanto para o ambiente de negócios (Candón *et al.*, 2019; Qiu *et al.*, 2015; El-Akruti *et al.*, 2013; Hastings, 2010). Adicionalmente, notou-se a necessidade de estudos que criem de forma estruturada a avaliação de investimentos associada à implementação de políticas efetivas de GA.

2.3 Procedimentos metodológicos

Design Science Research (DSR) foi usado como estratégia de pesquisa, da mesma forma que foi usado para pesquisas em GA por Meyer *et al.* (2014). A Figura 3 descreve essas ações em etapas e estágios de desenvolvimento de acordo com as etapas do DSR (Peffer *et al.*, 2007). A análise da primeira versão com base na revisão da literatura e entrevistas com especialistas resultou na segunda versão do framework, que foi avaliada por profissionais da indústria. A compilação das percepções dos profissionais permitiu a melhoria do framework de GA, resultando na terceira versão que é mais detalhada. As subseções a seguir abordam as entrevistas com os especialistas e a avaliação do framework pelos profissionais da indústria.

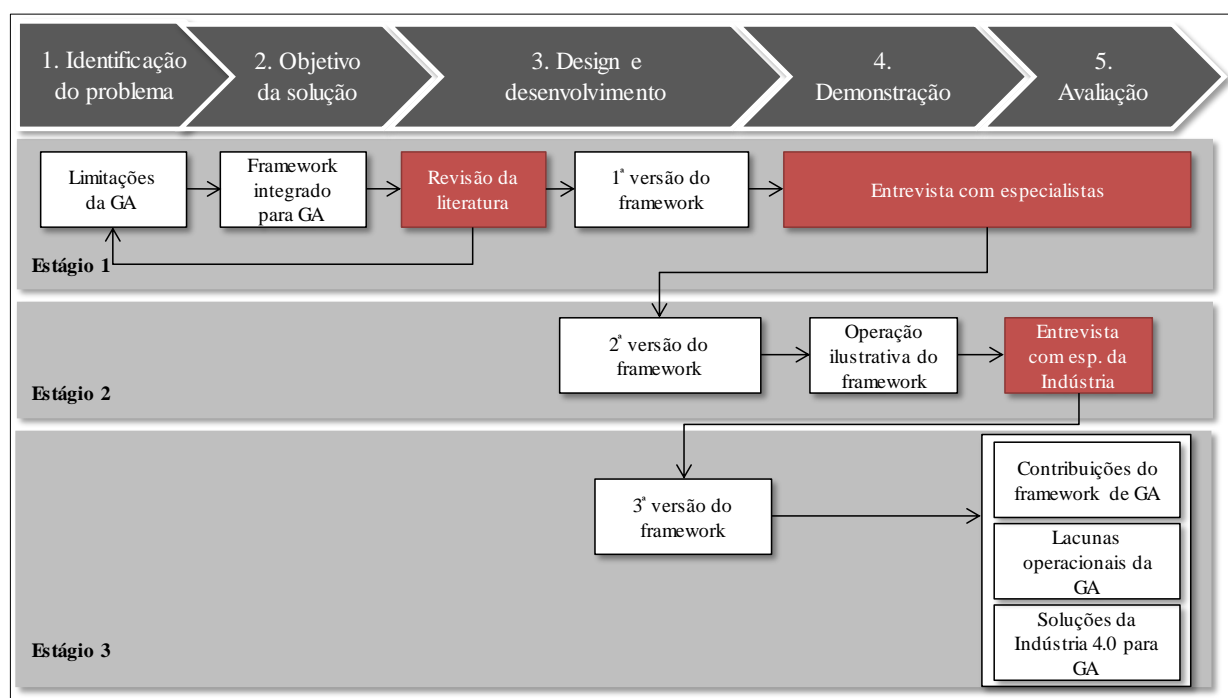


Figura 3: Estrutura de desenvolvimento do framework de GA. *As caixas vermelhas representam métodos específicos

2.3.1 Entrevistas com especialistas

A primeira versão do framework foi avaliada por quatro especialistas em GA, por meio de entrevistas individuais semiestruturadas. Os especialistas foram selecionados com base em sua experiência e conhecimento sobre o tema (Cooper e Schindler, 2014). Este estudo considera um especialista um profissional que já trabalhou com GA por meio de uma abordagem técnica e / ou financeira por pelo menos 10 anos em empresas de manufatura. Os perfis dos especialistas são apresentados na Tabela 1. As entrevistas seguiram um questionário que garantiu a resposta às principais questões. As entrevistas duraram entre 55 e 120 minutos e abordaram os seguintes

tópicos da GA: aspectos financeiros e técnicos; fatores-chave; integração de processos; ligação com a estratégia organizacional; nível de influência da norma ISO 55001 nos processos e práticas atuais; o papel do gerenciamento de ativos físicos nas empresas de manufatura; priorização de ativos; e o processo de gestão de ativos físicos.

Tabela 1: Perfil dos especialistas entrevistados

Entrevistado	Expertise	Profissão	Experiência	Setor
Especialista 1	FIN; TEC	Consultor	> 25 anos	A; B
Especialista 2	FIN	Gerente industrial	> 10 anos	C
Especialista 3	FIN; TEC	Consultor em GA	> 30 anos	B; D
Especialista 4	TEC	Gerente industrial	> 20 anos	B; E

Nota:

- **Expertise:** FIN = Contabilidade / Finanças ou TEC = Técnica

- **Setor:** A = Indústria de móveis; B = Indústria de máquinas e equipamentos; C = Indústria de produtos de tabaco; D = Indústria de cimento; E = Indústria de produtos da borracha e plástico

2.3.2 Entrevistas com profissionais da indústria

Para a coleta de dados, foram realizadas entrevistas semiestruturadas presenciais. Um conjunto de 30 questões e a segunda versão do framework desenvolvido foram utilizados para guiar as entrevistas. A Tabela 2 apresenta informações das empresas e uma breve descrição dos profissionais entrevistados.

Tabela 2: Empresas usadas no estudo de caso para o estágio de entrevistas com especialistas

Empresa	Setor	Ativo fixo (2018 / MM - US\$)	Tempo de fundação	Especialista da indústria
A	Fabricação de produtos refinados de petróleo e gás	US\$ 157.383,00	66 anos	- A.1 Gerente de operações - A.2 Gerente de GA
B	Eletricidade	US\$ 1.836,24	21 anos	- B.1 Gerente de GA - B.2 Espec. de manutenção
C	Fabricação de produtos de borracha e plásticos	US\$ 129,10	46 anos	- C.1 Ger. de Manutenção - C.2 Ger. de Eng ^a . Industrial

Etapas adicionais também foram realizadas para avaliar o framework proposto. Durante as entrevistas, os profissionais foram perguntados sobre a aplicabilidade do framework. Assim, as respostas foram classificadas em três categorias que avaliam a aplicabilidade das etapas e do framework:

A – Aceito - os profissionais classificam a etapa como totalmente aplicável e relevante para o processo gestão de ativos físicos;

P – Parcialmente aceito - os profissionais classificam a etapa como parcialmente aplicável e relevante para o processo de gestão de ativos físicos;

R - Rejeitado - os profissionais classificam a etapa como não aplicável e irrelevante para o processo de gestão de ativos físicos.

A fim de ampliar o entendimento sobre a aplicabilidade do framework e reduzir a subjetividade do processo, análises adicionais foram realizadas. Com base no entendimento dos autores ao longo das entrevistas, o grau de adoção (g_n) de cada fase do framework foi avaliado. Com esta análise, foi avaliado o grau de prontidão (D_R) das empresas para a implantação do processo de GA, de acordo com o framework proposto.

Para determinar o nível de implementação (L) de cada etapa do framework, a escala proposta pela norma SAE J4000 (2001) foi adaptada. Essa escala também foi usada recentemente por Pacchini *et al.* (2019). Essa avaliação é realizada identificando quatro níveis possíveis: L0 - A etapa não está presente ou existem grandes inconsistências em sua implementação; L1 - A etapa está presente, mas há pequenas inconsistências em sua implementação; L2 - A etapa está presente e implementada; e L3 - A etapa está totalmente presente.

Para medir o g_n para cada fase do framework, foi utilizado o modelo proposto por Pacchini *et al.* (2019). Portanto, o g_n de uma dada fase “n” pode ser calculado dividindo o número total de pontos atribuídos na avaliação das etapas pela soma dos pontos máximos possíveis para cada etapa desta fase. A equação (1) apresenta este cálculo:

$$g_n = \frac{\sum \text{pontos obtidos na avaliação da etapa (L)}}{\text{Máximo de pontos possíveis (L)}} \quad (1)$$

Além da avaliação de cada fase, esta análise visa avaliar a prontidão das empresas em relação à adoção do framework. Para avaliar a D_R das empresas, o modelo proposto por Pacchini *et al.* (2019) foi adotado, onde $g_1, g_2, g_3, \dots, g_n$ são as 'n' fases do processo a serem consideradas. Assumindo que todas as fases do processo são igualmente importantes, o D_R das empresas em relação à adoção do framework para GA é dado por:

$$D_R = \frac{g_1 + g_2 + g_3 + \dots + g_n}{n} = \frac{\sum_1^n g_m}{n} \quad (2)$$

Onde: D_R = grau de prontidão da empresa;

g_1 = grau de adoção da fase 1;

g_2 = grau de adoção da fase 2;

g_n = grau de adoção da fase n;

n = número total de fases consideradas;

g_m = grau de adoção da fase m.

Para auxiliar na compreensão dos resultados, esta análise adotou uma adaptação da métrica de seis níveis sequenciais e cumulativa baseada nas normas ISO / International Electrotechnical Commission (IEC) 15504-5 (ISO / IEC 15504-5: 2004), apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: status do grau de prontidão

Grau de prontidão (D_R) - %	Status	Descrição
$0 \leq D_R < 10$	Embrionário	A empresa tem algum conhecimento superficial de um pequeno número de etapas do processo
$10 \leq D_R < 25$	Inicial	A empresa tem algum conhecimento de algumas etapas do processo, mas pode não conhecer todas elas
$25 \leq D_R < 50$	Primário	A empresa conhece bem todas as etapas do processo, mas nem todas já foram adotadas
$50 \leq D_R < 75$	Intermediário	A empresa tem pleno conhecimento de todas as etapas do processo e todas já começaram a ser adotadas
$75 \leq D_R < 90$	Avançado	A empresa possui pleno conhecimento de todas as etapas do processo e todas possuem alto grau de adoção
$90 \leq D_R \leq 100$	Pronto	A empresa possui praticamente todas as etapas do processo em grau pleno de máxima adoção

2.4 Resultados

Esta seção apresenta os resultados obtidos com base na aplicação do método proposto neste estudo.

2.4.1 Percepção dos especialistas para processo de GA

Os especialistas relataram diferentes perspectivas sobre como os processos da gestão de ativos físicos são e como deveriam ser tais processos. Por outro lado, existem complementaridades entre os diversos relatos que levam a um melhor entendimento do processo de GA nas empresas de manufatura. Essas observações corroboram com as indicações de Aghabegloo *et al.* (2024), Petchrompo e Parlikad (2019), e Ruitenburg e Braaksma (2017) que classificam a gestão de ativos físicos como uma área pouco explorada na literatura.

Outro aspecto é o consenso entre os entrevistados sobre a necessidade de se estabelecer um processo integrado com as diversas áreas que circundam a GA. No entanto, apontam que, atualmente, algumas atividades visam isso, no entanto, essas atividades não são pautadas por um processo com uma visão abrangente da GA. Outro achado aborda a configuração atual do processo, que é dividido em abordagens técnicas e financeiras, também destacadas por Hastings (2010).

Em geral, especialistas afirmam que a adoção de padrões normativos para orientar a GA nas empresas de manufatura é incipiente. Para os especialistas entrevistados, as poucas ações de GA seguem políticas internas, sem empregar a visão ampliada necessária para um sistema de GA eficaz. Nesse sentido, essas perspectivas corroboram a visão de autores como Petchrompo e Parlikad (2019), Alsyouf *et al.* (2018), e Roda e Macchi (2016), que relacionam o crescimento do tema GA com a recente publicação da série de normas ISO 55000.

Em relação à GA como uma questão estratégica, os especialistas destacam que essa questão está fortemente relacionada ao tipo de setor. Segundo os relatos, a visão estratégica se limita a poucos setores, como o elétrico. Já em outros setores onde o uso de ativos físicos não apresenta a mesma intensidade e notoriedade, esta visão estratégica dos ativos pode surgir em momentos discretos. Assim, os especialistas destacam a necessidade de desenvolver essa visão mais ampla da GA para contribuir com o alcance dos objetivos da empresa.

Os especialistas divergem sobre as áreas que atualmente estão presentes no processo de GA. No entanto, estes convergem ao destacar a necessidade de existir um processo estruturado de GA. Assim, segundo esses especialistas, o processo de GA deve ser operacionalizado com a participação de todas as áreas da empresa.

De maneira geral, os especialistas apontam a inexistência de processos formais de GA. No entanto, mencionam que várias atividades ocorrem de forma fragmentada, sem necessariamente serem orientadas por um processo de GA no nível organizacional. Conforme mencionado anteriormente, os especialistas apresentam visões semelhantes sobre a necessidade e o desafio de integrar essas áreas, permitindo que o processo de tomada de decisões da GA esteja alinhado aos objetivos do negócio. Nesse sentido, autores como Aghabegloo *et al.* (2024), Maletič *et al.* (2020), Ruitenburg e Braaksma (2017) e El-Akruti *et al.* (2013) destacam a necessidade e os desafios de alinhar as diversas ações da GA com os objetivos estratégicos da organização.

Os especialistas convergem quanto à adoção de critérios para a priorização de ativos físicos pelas empresas. Eles afirmam que os esforços nessa direção são mínimos e limitados. Para os especialistas, o processo de GA desempenha um papel relevante nas empresas de manufatura e na indústria em geral. A partir da adoção desse processo, as empresas buscam estabelecer o melhor desempenho ao longo do ciclo de vida dos ativos, contribuindo para o alcance dos objetivos do negócio. Da mesma forma, autores como Aghabegloo *et al.* (2024), Maletič *et al.* (2020), Petchrompo e Parlikad (2019), Roda e Macchi (2016) e Schuman e Brent (2005) mencionam a dependência das empresas de manufatura em relação ao desempenho dos seus ativos físicos.

Em relação às dificuldades encontradas nos processos atuais, é consenso entre os especialistas que a falta de comunicação entre as áreas administrativa e operacional é um dos principais elementos que dificultam o funcionamento e integração do processo de GA (Maletič *et al.*, 2020; Kans e Galar, 2016). Assim, El-Akruti *et al.* (2013) observam que uma das maiores dificuldades para integração de processos é justamente o desafio de gerenciar o inter-relacionamento das diversas atividades desse processo.

Além da necessidade de integração das áreas para atuar em linha com os objetivos estratégicos da organização, os especialistas citaram outros fatores, tais como: a adoção de um processo de tomada de decisão multicritério, ações para priorizar os ativos com base na estratégia da organização, compreender e aceitar a GA como um processo integrado por todos os níveis da organização, entre outros. O processo de tomada de decisão deve necessariamente contemplar, ao mesmo tempo, a visão operacional, financeira, econômica e patrimonial.

Assim, é necessário determinar e detalhar o processo de GA, que inclui atividades nos níveis estratégico, tático e operacional. A fim de atender a essas necessidades e as lacunas relatadas pelos especialistas e identificadas na literatura, a próxima subseção apresenta a terceira versão do framework de GA.

2.4.2 Framework para gestão de ativos físicos

O framework insere a gestão de ativos físicos na estrutura organizacional, chamada de "Contexto Organizacional e Partes Interessadas", que abrange os objetivos organizacionais e os requisitos e expectativas das partes interessadas (ISO 55001: 2014; Hastings, 2010). Essa estrutura orienta e é a base do processo de gestão de ativos físicos, apresentada na terceira camada da Figura 4. Também é composta por níveis, fases e etapas. As etapas são os aspectos mais detalhados da estrutura e são mencionados por números (consulte a Figura 4) entre parênteses durante a explicação do framework, conforme segue nos próximos parágrafos.

Assim, no nível estratégico, adota-se a visão holística da organização, apresentada por Marquez *et al.* (2020), El-Akruti (2012), Hastings (2010) e PAS 55: 2008. Após o entendimento dos objetivos organizacionais, é iniciada a fase de tomada de decisão. Conforme proposto pela ISO 55000: 2014 e mencionado pelos especialistas, a primeira etapa consiste na definição do plano estratégico, planos de controle, estratégias, processo de tomada de decisão e política de GA (1.1). Esses elementos definem as diretrizes para a gestão dos ativos disponíveis, bem como orientam as

intervenções necessárias na estrutura de ativos físicos da organização. Da mesma forma, nesta etapa, são definidos os objetivos da GA (1.2), que correspondem ao desdobramento dos objetivos estratégicos da organização em objetivos a serem alcançados pelo desempenho da estrutura de ativos físicos.

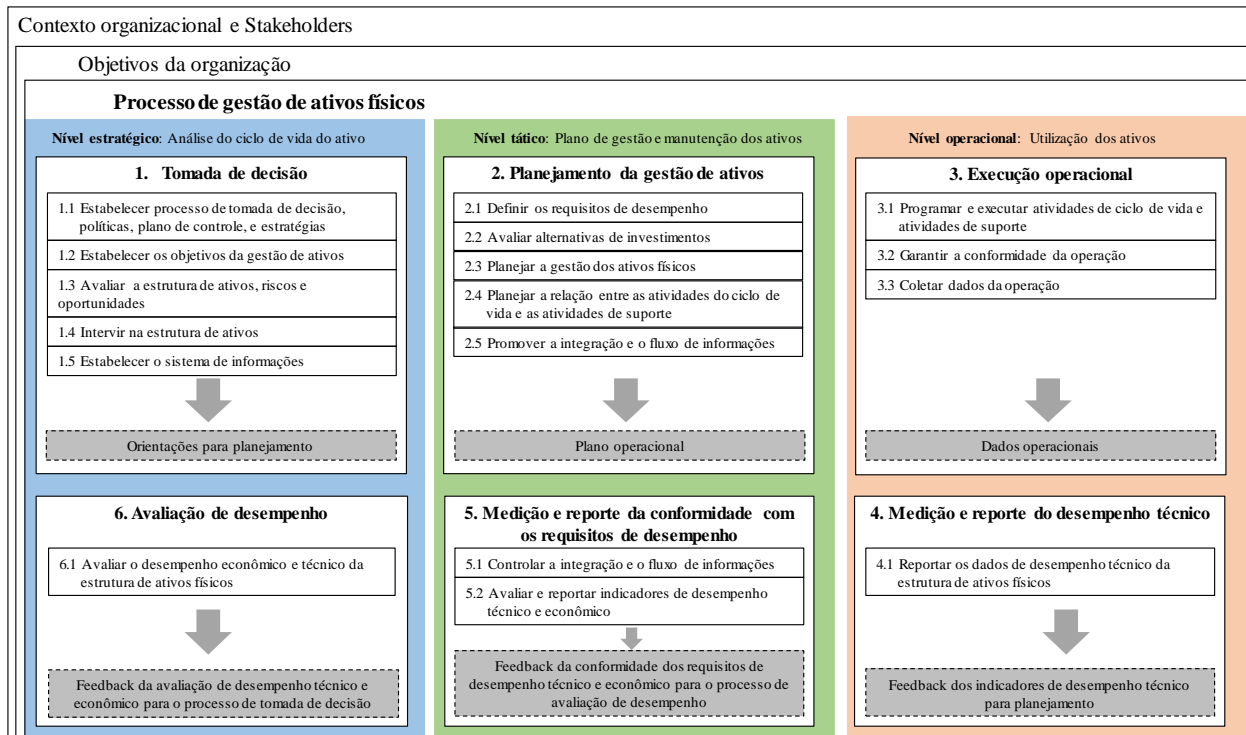


Figura 4: Framework para GA. Os retângulos cinza representam os resultados, enquanto os brancos são fases e etapas do processo de GA

Definidos os objetivos, a próxima etapa refere-se à coleta das informações sobre os ativos físicos da organização (1.3). Conforme apontam os especialistas, avaliar a estrutura dos ativos físicos exige diagnóstico da situação atual dos ativos da organização. Segundo El-Akruti (2012), GA parte de uma estrutura física de ativos existente na organização. Assim, uma das saídas dessa etapa é a elaboração de uma base contendo informações detalhadas sobre todos os ativos físicos da organização que devem ser contemplados pelo processo de GA. Da mesma forma, a organização deve estabelecer uma sistemática para tratar continuamente os riscos e oportunidades relacionados à estrutura de ativos (ISO 55001: 2014).

Com a compreensão da situação atual e dos riscos e oportunidades, deve ocorrer a avaliação das necessidades potenciais de intervenções na estrutura de ativos físicos da organização (1.4). Conforme apontado por Maletič *et al.* (2020), Hastings (2010), e os especialistas, as alternativas possíveis envolvendo ativos físicos são: criação, aquisição, uso, manutenção, substituição ou descarte. Adicionalmente, conforme destacado pela ISO 55001: 2014 e pelos especialistas, a decisão pode contemplar a adoção de práticas de terceirização. Nesse caso, a

organização não possui mais a propriedade do ativo físico, mas contrata um serviço prestado por outra organização para atender às demandas do negócio. Portanto, além de apoiar o ciclo de vida do ativo, a terceirização também pode influenciar a configuração da estrutura de ativos físicos da organização. Assim, a organização deve garantir o controle dos processos e atividades terceirizadas. Além disso, a empresa deve avaliar os riscos desta decisão (Maletič *et al.*, 2020; ISO 55001: 2014; El-Akruti, 2012; Hastings, 2010). Assim, o objetivo da tomada de decisão é indicar intervenções para garantir o ajuste entre a estrutura de ativos físicos e os objetivos e necessidades organizacionais (Aghabegloo *et al.*, 2024; ISO 55002: 2014; El-Akruti *et al.*, 2013).

Nesse sentido, o sistema de informações (1.5) deve incluir os requisitos de dados dos níveis estratégico, tático e operacional (Candón *et al.*, 2019; De la Fuente *et al.*, 2018; Kans e Galar, 2016). A arquitetura do sistema deve incluir indicadores-chave de desempenho para o nível estratégico, como características dos ativos, a necessidade de fluxo de informações, e a classificação dos ativos físicos para o nível operacional (Aghabegloo *et al.*, 2024; Alsyouf *et al.*, 2018). Além disso, esse sistema deve oferecer suporte aos requisitos de registro de informações das partes interessadas para divulgação interna e externa. Assim, o sistema deve atender aos requisitos do sistema contábil, bem como aos requisitos de gestão operacional, como manutenção e materiais (Amadi-Echendu *et al.*, 2010; Hipkin, 2001). Dessa forma, o sistema de informações estabelece a integração e o fluxo de informações ao longo de todo o processo de GA (Marquez *et al.*, 2020; ISO 55001: 2014; Hastings, 2010).

Uma vez concluída a fase de Tomada de Decisão, o sistema de informações deve definir o fluxo dessas informações para o nível tático, na forma de diretrizes para o planejamento. Nesta fase, inicialmente são estabelecidos os requisitos de desempenho para os ativos (2.1), de forma que conduzam a organização ao alcance de seus objetivos. Assim, essas análises precisam incluir requisitos técnicos e econômicos, conforme apontado pelos especialistas. Além disso, o modelo engloba a análise dos requisitos financeiros, legais, regulatórios e organizacionais, conforme proposto pela ISO 55001: 2014. Esses requisitos também devem orientar o processo de avaliação de alternativas de investimento em ativos físicos (2.2). As empresas também devem definir métricas para avaliar o desempenho dos ativos em toda a operação, ou seja, elementos para apoiar o monitoramento e controle do desempenho dos ativos e a priorização desses ativos.

Após a priorização dos ativos com base na sua contribuição para os objetivos da organização (Aghabegloo *et al.*, 2024; Petchrompo e Parlikad, 2019), o que também foi destacado pelos especialistas nas entrevistas, o plano de gestão de ativos físicos (2.3) é iniciado. Esta etapa deve ser orientada pela priorização, classificação, e nos níveis de desempenho desejados para os

ativos físicos (Maletič *et al.*, 2020; El-Akruti *et al.*, 2013). Este plano deve estabelecer as atividades a serem implementadas e os recursos que serão aplicados para atender aos requisitos da GA e, conseqüentemente, o cumprimento dos objetivos da organização (ISO 55002: 2014). Além de planejar atividades para a operação dos ativos, este plano geralmente inclui atividades relacionadas à implementação de novos ativos, onde abordagens de gerenciamento de projetos podem ser empregadas.

Da mesma forma, deve-se planejar o relacionamento entre as atividades do ciclo de vida e as atividades de suporte (2.4), como terceirização, recursos humanos e saúde e segurança ocupacional. Esse planejamento visa sincronizar as atividades do ciclo de vida com as atividades de suporte, identificando todos os requisitos dessas atividades de forma planejada (El-Akruti *et al.*, 2013; El-Akruti, 2012).

Por fim, essa fase engloba também o desenvolvimento de ações para garantir e melhorar a integração e o fluxo das informações (2.5) ao longo do processo de GA. Nesse sentido, o processo de GA deve verificar continuamente se todos os requisitos de informação e o fluxo de informações estão adequadamente atendidos pelo sistema de informações. A fase de planejamento resulta na criação de um Plano Operacional de Gestão de Ativos Físicos, que fornece diretrizes para a operação. O objetivo deste plano é traduzir as estratégias e diretrizes definidas no nível estratégico em ações operacionais (Marquez *et al.*, 2020; El-Akruti *et al.*, 2013).

Com base na definição do plano no nível tático, a terceira fase abrange a execução desse plano no nível operacional. Esta fase inclui a execução das atividades e ações contidas no plano de GA previamente definido. Assim, programar e executar (3.1) correspondem as ações semanais ou diárias, visando seguir o planejamento estabelecido, alinhando as atividades do ciclo de vida com as atividades de suporte. Ao mesmo tempo, as atividades regulares de controle do processo devem fornecer suporte e garantir o cumprimento e a eficácia (3.2) nas entregas definidas pelo plano de GA (El-Akruti, 2012). Nesse sentido, ao longo das atividades operacionais, os dados devem ser coletados e reportados por meio do sistema de informações (3.3). Essas etapas resultam em dados operacionais que são entradas para as próximas fases do processo de GA.

Finalizada a fase de execução operacional, na quarta fase é realizado a medição e o reporte do desempenho técnico dos ativos (4.1). Dessa forma, os dados de desempenho técnico da estrutura de ativos físicos são monitorados e reportados. Além disso, esta etapa fornece feedback dos indicadores de desempenho técnico para atividades de planejamento. Assim, essas atividades formam um banco de dados que subsidia a formulação de planos futuros, contribuindo para a

melhoria contínua do processo de GA (Marquez *et al.*, 2020; Kans e Galar, 2016; El-Akruti *et al.*, 2013; Amadi-Echendu *et al.*, 2010).

A partir do feedback dos indicadores técnicos, dá-se a quinta fase do processo. Esta fase inclui a medição e reporte da conformidade dos requisitos de desempenho. Dessa forma, todos os indicadores de desempenho de alto nível são avaliados e reportados. Esses indicadores estão relacionados aos requisitos de desempenho técnico e econômico (5.2) que são determinados com base na compreensão das necessidades do negócio. Esta fase também deve incluir ações de controle relacionadas à integração e fluxo de informações (5.1) exigidas pelo processo de GA. Como resultado, esta fase fornece feedback sobre o cumprimento dos requisitos de desempenho econômico e técnico para o processo de avaliação de desempenho no nível estratégico (Alsyouf *et al.*, 2018; El-Akruti, 2012).

A partir das informações recebidas do nível tático, a sexta fase busca avaliar o desempenho econômico e técnico da estrutura de ativos físicos (6.1). Por fim, por ser um processo contínuo, os resultados dessa avaliação fornecem feedback para apoiar o processo de tomada de decisão na fase 1. Assim, os resultados desta avaliação constituem conhecimentos na forma de lições aprendidas, que fornecem suporte ao processo decisório de investimentos e planos futuros. Este *feedback* busca não apenas melhorias na estrutura e no desempenho dos ativos, mas também no processo de GA, que deve ser continuamente aprimorado. A realização dessas atividades regulares de medição sistemática, monitoramento, análise e avaliação, permite avaliar o desempenho dos ativos da organização. Da mesma forma, o portfólio de ativos físicos da organização deve ser continuamente avaliado. Esta avaliação permite assegurar a pertinência do portfólio de ativos com os objetivos organizacionais (Maletič *et al.*, 2020; ISO 55002: 2014).

Por fim, por ser um processo contínuo, o modelo proposto retorna à etapa de tomada de decisão a partir das informações de desempenho dos ativos. Assim, o processo decisório busca estabelecer o compromisso para com ações de melhoria contínua da estrutura, do desempenho e do processo de gestão de ativos físicos, visando à congruência para com os objetivos do negócio.

2.4.3 A percepção dos profissionais da indústria sobre o framework de gestão de ativos físicos

Inicialmente, os profissionais avaliaram a aplicabilidade das 17 etapas do framework proposto. No total, foram obtidas 51 respostas nas três empresas pesquisadas. Em 94,1% dessas respostas, os profissionais classificaram as etapas como totalmente aplicáveis e relevantes para o

processo gestão de ativos físicos. Em apenas 5,9% das respostas, os profissionais definiram as etapas como parcialmente aplicáveis e relevantes para o processo. Nenhuma etapa foi classificada como não aplicável ou não relevante ao processo. A Tabela 4 apresenta as respostas dos profissionais sobre a aplicabilidade das etapas para suas empresas, bem como a avaliação do D_R das empresas para adotar o processo de gestão de ativos físicos de acordo com o framework proposto.

Os resultados da avaliação confirmaram que existem diferenças entre os D_R das empresas. As empresas A e B, com respectivos valores de D_R de 57,6% e 64,3%, encontram-se numa fase intermediária de adoção do processo de GA. De acordo com a classificação proposta essas empresas conhecem todas as etapas do processo e já iniciaram a sua adoção (ver Tabela 3). Por outro lado, a empresa C está em um estágio primário de adoção do processo de GA, com resultado de D_R de 25,0%. Ou seja, a empresa conhece todas as etapas do processo, porém não adota todas essas etapas.

O fato de as fases 3, 1 e 2 apresentarem o maior g_n (81,5%; 57,8% e 48,9% respectivamente) mostra (i) a predominância do fluxo de informações top-down entre os níveis; (ii) que as atividades e processos atualmente empregados para administrar ativos físicos sejam orientados pelo nível estratégico; entretanto, (iii) há menos ênfase no desdobramento dessas diretrizes estratégicas em planos táticos para execução no nível operacional. Além disso, esses resultados mostram que (iv) o fluxo de feedback (fases 4, 5 e 6) do processo de GA ainda apresenta baixa adoção.

O baixo nível de g_n encontrado nas últimas três fases do framework, que englobam principalmente o feedback de informações do nível operacional para o nível tático e, em seguida, para o nível estratégico, compromete a qualidade das informações que suportam a tomada de decisão em todo o processo de GA. Conforme relatam os profissionais e os especialistas, a tomada de decisões no nível estratégico deve abranger informações técnicas e operacionais, além das estratégicas. Assim, fica evidente a falta de mecanismos que garantam o fluxo adequado de informações do nível operacional ao estratégico para apoiar o processo de tomada de decisão nas três empresas. A descontinuidade desse fluxo de informações críticas fica evidente principalmente nas fases 5 e 6, uma vez que ambas as fases apresentam as menores médias para o nível de adoção g_n (38,9% e 22,2% respectivamente). Os profissionais das três empresas relatam dificuldades como grande quantidade e variedade de dados, diferentes formas de cadastro e falta de integração entre os diversos sistemas de informações utilizados. Todos esses elementos podem causar dificuldades

de acesso e perda de informações relevantes que comprometem o processo de tomada de decisão no nível estratégico.

Algumas peculiaridades de cada empresa podem ser confirmadas a partir dos resultados obtidos. O resultado alcançado pela empresa A, $D_R = 57,6\%$, demonstra que as etapas do processo de GA são realizadas na empresa, uma vez que essa possui um alto nível de processos de gestão da operação, porém, há uma lacuna no sistema de GA por não estar formalizado e sistematizado. Por outro lado, a empresa B apresentou o maior resultado, $D_R = 64,3\%$, o que confirma o esforço da empresa em relação ao fortalecimento do processo de GA, visto que a empresa está em processo de certificação do seu sistema de GA com base na ISO 55001: 2014.

Tabela 4: Aplicabilidade do framework e nível de prontidão

Processo de gestão de ativos físicos	Empresa						Média
	Aplicabilidade		Aplicabilidade		Aplicabilidade		
	Grau de adoção da fase (gn)		Grau de adoção da fase (gn)		Grau de adoção da fase (gn)		
1. Tomada de decisão	53.3%		86.7%		33.3%		57.8%
1.1 Estabelecer processo de tomada de decisão, políticas, plano de controle, e estratégias	A	1.0	A	3.0	A	0.0	1.3
1.2 Estabelecer os objetivos da gestão de ativos	A	1.0	A	2.0	A	0.0	1.0
1.3 Avaliar a estrutura de ativos, riscos e oportunidades	A	2.0	A	3.0	A	1.0	2.0
1.4 Intervir na estrutura de ativos	A	2.0	A	3.0	A	2.0	2.3
1.5 Estabelecer o sistema de informações	A	2.0	A	2.0	A	2.0	2.0
2. Planejamento da gestão de ativos	53.3%		60.0%		33.3%		48.9%
2.1 Definir os requisitos de desempenho	A	2.0	A	2.0	A	2.0	2.0
2.2 Avaliar alternativas de investimentos	A	2.0	A	3.0	A	1.0	2.0
2.3 Planejar a gestão dos ativos físicos	A	2.0	A	2.0	A	1.0	1.7
2.4 Planejar a relação entre as atividades do ciclo de vida e as atividades de suporte	A	1.0	A	1.0	P	0.0	0.7
2.5 Promover a integração e o fluxo de informações	A	1.0	A	1.0	A	1.0	1.0
3. Execução operacional	88.9%		88.9%		66.7%		81.5%
3.1 Programar e executar atividades de ciclo de vida e atividades de suporte	A	2.0	A	2.0	A	2.0	2.0
3.2 Garantir a conformidade da operação	A	3.0	A	3.0	A	2.0	2.7
3.3 Coletar dados da operação	A	3.0	A	3.0	A	2.0	2.7
4. Medição e reporte do desempenho técnico	66.7%		66.7%		0.0%		44.4%
4.1 Reportar os dados de desempenho técnico da estrutura de ativos físicos	A	2.0	A	2.0	A	0.0	1.3
5. Medição e reporte da conformidade com os requisitos de desempenho	50.0%		50.0%		16.7%		38.9%
5.1 Controlar a integração e o fluxo de informações	P	1.0	A	2.0	P	1.0	1.3
5.2 Avaliar e reportar indicadores de desempenho técnico e econômico	A	2.0	A	1.0	A	0.0	1.0
6. Avaliação de desempenho	33.3%		33.3%		0.0%		22.2%
6.1 Avaliar o desempenho econômico e técnico da estrutura de ativos físicos	A	1.0	A	1.0	A	0.0	0.7
Grau de prontidão (D_R)	57.6%		64.3%		25.0%		49.0%

Aplicabilidade: A - Aceito; P - Parcialmente aceito; R - Rejeitado.

A empresa B apresenta o maior g_n ($g_n = 86,7\%$) para a fase se comparada com as demais empresas, e é a única empresa onde este valor se aproxima do maior g_n ($g_n = 88,9\%$) da fase 3.

Assim, os resultados mostram que a participação e o apoio da gestão estratégica são determinantes para a estruturação do processo de GA, conforme destacado pelos especialistas. Por fim, a empresa C apresentou o menor resultado, $D_R = 25,0\%$, o que demonstra que esta organização ainda não engajou esforços suficientes para estruturar o processo de gestão dos seus ativos físicos.

À luz da avaliação da aplicabilidade e do D_R das empresas para adoção do framework proposto, os resultados mostram que o framework contém as etapas reconhecidas como relevantes pelas empresas, além de serem potencialmente aplicáveis. Além disso, todas as etapas do framework foram aceitas como aplicáveis pela empresa com o maior D_R . Porém, devido ao baixo nível de adoção das etapas finais do framework, observa-se que ainda há espaço para as empresas aprimorarem a estruturação do processo de GA. Essa lacuna na adoção do processo de GA é discutida na seção seguinte.

2.5 Discussão

Esta seção discute as contribuições trazidas pelo framework proposto, os gaps no contexto de operacionalização do processo de GA, e soluções da Indústria 4.0 para suportar o processo de GA.

2.5.1 Contribuições do framework de GA

A construção do framework em conjunto com o processo de avaliação possibilitou avaliar as práticas de GA adotadas por empresas de capital intensivo para a gestão de seus ativos físicos. Embora as empresas A e B estejam no nível intermediário de adoção do processo, a empresa B está notavelmente mais perto de superar esse estágio. Conforme observado nas entrevistas, a empresa B encontra-se em processo de certificação do seu sistema de GA seguindo os requisitos da ISO 55001: 2014. Isso mostra que, em relação à empresa A, a empresa B está mais próxima de atingir o nível avançado, onde além do conhecimento das etapas do processo, a empresa detém um alto g_n dessas etapas. A empresa C, que é classificada no nível de adoção primário do processo, está mais próxima do estágio inicial anterior do que do nível intermediário. Conforme constatado nas entrevistas, a empresa C tem muitos desafios para chegar ao estágio intermediário, onde além de conhecer todas as etapas do processo, precisa começar a adotá-las.

O alto nível de adoção da fase '3 Execução operacional' reforça o fato de que independentemente de as empresas terem ou não um plano de GA adequado, as empresas de capital

intensivo são altamente dependentes da operação de seus ativos físicos (Aghabegloo *et al.*, 2024; Brous *et al.*, 2018; Roda e Garetti, 2014).

Outro aspecto observado nos resultados é a orientação fornecida pelo nível estratégico para apoiar a estruturação do processo de GA, conforme destacado pelos especialistas. Isso foi evidenciado nos resultados da empresa B para o nível de adoção da fase 1 no nível estratégico. Esse resultado mostra que um elevado engajamento no nível estratégico contribui positivamente para o desenvolvimento do processo de GA da empresa. De acordo com Aghabegloo *et al.* (2024), Ruitenburg e Braaksma (2017), e El-Akruti *et al.* (2013), a GA deve ser orientada pelas necessidades estratégicas do negócio.

Por outro lado, o baixo D_R apresentado pela empresa C também remete a um aspecto já citado na literatura. Tanto especialistas quanto literatura, como os estudos de Aghabegloo *et al.* (2024), Koukias e Kiritsis (2015), e El-Akruti *et al.* (2013) apontam que mesmo em empresas de capital intensivo, como as empresas de manufatura, ainda há um entendimento limitado da contribuição da GA para a configuração e implementação das estratégias da organização.

Portanto, os resultados da D_R das empresas mostram que as organizações possuem o conhecimento e até realizam diversas atividades de GA. No entanto, conforme destacado pelos especialistas, essas atividades são realizadas de forma fragmentada ao longo do ciclo de vida dos ativos. Assim, segundo os profissionais e especialistas, este estudo fornece subsídios para gestores na estruturação do processo de GA.

2.5.2 Lacunas operacionais da GA

Conforme descrito por especialistas e autores como Maletič *et al.* (2020), Marquez *et al.* (2020), Koukias e Kiritsis (2015) e El-Akruti *et al.* (2013), o relacionamento entre as atividades de GA ainda não está suficientemente integrado e controlado de forma a maximizar a entrega de valor para a organização. Essa falta de integração e controle justifica o desenvolvimento do processo de GA, que estimula a captura de valor dos ativos físicos. Além disso, esse processo também promove atividades e procedimentos sistematizados e coordenados. Por sua vez, essa coordenação permite que as organizações gerenciem de forma otimizada os ativos físicos, estabelecendo a melhor relação entre custos, riscos e desempenho (Maletič *et al.*, 2020; Petchrompo e Parlikad, 2019; ISO 55000: 2014).

Outro aspecto identificado nos resultados foi o baixo D_R das empresas nas últimas três fases do processo de GA do framework proposto. Essas fases são responsáveis pelo fluxo de informações desde o nível operacional até o nível estratégico. Portanto, esse cenário pode afetar o fluxo de informações que apoia a tomada de decisão em todo o processo de GA. De acordo com Brous *et al.* (2018), GA é um processo de negócios que depende muito de grandes quantidades de dados que são então transformados em informações para apoiar a tomada de decisão ao longo de todo o ciclo de vida dos ativos.

Assim, estruturar um processo integrado de GA, que abranja os níveis operacional, tático e estratégico (Marquez *et al.*, 2020; Qiu *et al.*, 2015; El-Akruti *et al.*, 2013) é um desafio para as empresas de manufatura. Essas organizações também precisam estabelecer um processo de tomada de decisão norteado por fatores técnicos, financeiros e econômicos (Marquez *et al.*, 2020; Kans e Galar, 2016; Ruitenburg e Braaksma, 2017; Hastings, 2010), garantindo que, além do desempenho operacional, os investimentos em ativos também forneçam retorno econômico e financeiro favoráveis para a organização.

Os resultados mostram um consenso entre os profissionais sobre a necessidade de estruturar e operacionalizar o processo de GA. Além disso, os profissionais classificam como altamente aplicável nas empresas o framework proposto neste estudo. Por outro lado, tanto especialistas quanto profissionais relatam algumas dificuldades em operacionalizar o processo de GA. Alguns exemplos são a falta de integração entre os sistemas de informação, o lapso de tempo entre as atividades do ciclo de vida dos ativos, a dificuldade de acesso às informações e a organização e interpretação dos dados para gerar informações de apoio à tomada de decisão. Outro aspecto relatado pelos profissionais é o desafio de unificar processos que gerenciam funções abrangentes e ativos físicos em vários sites de uma organização (IBM, 2019). Para Macchi *et al.* (2018) e Roda e Macchi (2016), a integração da informação e a comunicação são elementos que possibilitam a efetiva implementação do processo de GA.

Nesse sentido, os avanços tecnológicos recentes trazem novas perspectivas devido às oportunidades e relevância que os dados e informações assumiram no processo de GA (Maletič *et al.*, 2020; Brous *et al.*, 2018; Macchi *et al.*, 2018; Kans e Galar, 2016). Gestão de ativos baseada em dados e informações, por exemplo, com a adoção de tecnologias da Indústria 4.0, podem ter impactos significativos para as organizações (Spüntrup e Imsland, 2018; IBM, 2019).

2.5.3 Soluções da indústria 4.0 para GA

Segundo Spüntrup e Imsland (2018), os desenvolvimentos tecnológicos recentes trazidos pela Indústria 4.0 permitem novas possibilidades para a implementação da GA. Essas tecnologias ajudam a resolver problemas relacionados à questão do longo intervalo de tempo entre as atividades que ocorrem ao longo do ciclo de vida. Tais tecnologias também auxiliam na integração de todas as áreas da empresa e favorecem a disponibilidade e acesso em tempo real de informações para apoiar o processo de tomada de decisão (Brous *et al.*, 2018; Macchi *et al.*, 2018; Spüntrup e Imsland, 2018).

Existem muitas oportunidades e desafios que surgem das tecnologias da Indústria 4.0 na indústria (Veile *et al.*, 2019). Um monitoramento mais avançado de ativos está disponível à medida que mais tecnologias são implementadas nas operações (Klingenberg *et al.*, 2019; Spüntrup e Imsland, 2018). Segundo Roda e Macchi (2016), uma das causas para as lacunas na integração nos processos de GA pode ser atribuída ao baixo nível de desenvolvimento tecnológico das empresas. Assim, a definição das tecnologias implementadas, sua forma de implementação e como avaliar os benefícios alcançados com essas tecnologias são questões que as organizações atuais precisam abordar. Para Macchi *et al.* (2018), muitas oportunidades e desafios para a GA surgem a partir das tecnologias digitais, que ainda precisam ser exploradas pelas organizações. A aplicação das tecnologias avançadas de análise e otimização permite que a GA transforme grandes quantidades de dados, de medições e sensores, em informações importantes para a tomada de decisão (Klingenberg *et al.*, 2019).

Portanto, muitas organizações estão implementando tecnologias, como por exemplo Internet das Coisas (IoT), como uma ferramenta GA para enfrentar os desafios relacionados à complexidade e distribuição física do portfólio de ativos, já que essa tecnologia permite novas formas de coleta de dados e monitoramento dos ativos (Brous *et al.*, 2018). No estudo apresentado por Brous *et al.* (2018), os autores investigam o efeito da adoção da IoT no processo de tomada de decisão da GA. Junto com outras tecnologias, o conceito de IoT representa um cenário em que os ativos físicos são equipados com sensores, permitindo a comunicação automática de seu status com outros ativos, bem como o compartilhamento de dados de desempenho em tempo real (Brous *et al.*, 2018). Uma vez que os dados são capturados e armazenados, o uso de ferramentas como Data Analytics permite uma capacidade preditiva sobre o funcionamento dos ativos, como alertas de falha e outras informações que apoiam o processo de tomada de decisão a fim de otimizar o desempenho dos ativos (Macchi *et al.*, 2018). Além de tecnologias operacionais como Manufatura

Aditiva e Robôs Colaborativos, essa nova revolução possibilita grandes oportunidades devido à adoção de tecnologias móveis, em nuvem e analíticas para coletar, integrar e analisar dados para melhorar o desempenho dos ativos (IBM, 2019).

2.6 Conclusões

Este artigo atingiu o objetivo de analisar as práticas atuais de GA, a opinião de especialistas sobre o assunto e, com base na revisão da literatura, desenvolver um framework para orientar o processo de gestão de ativos físicos em empresas de capital intensivo, especialmente empresas de manufatura. Além disso, também foi avaliado o nível de adoção do processo de GA, que apresentou um baixo nível de implantação nas empresas analisadas. Isso revela uma compreensão limitada dessas empresas em relação ao papel da GA no desenvolvimento e implementação das estratégias da organização.

Com base na revisão da literatura e nos dados empíricos, este estudo mostrou que o processo de gestão de ativos físicos ainda carece de estudos que forneçam definições mais robustas sobre como conduzir esse processo. Este estudo também destaca o nível de relevância da GA no desempenho das empresas. Portanto, estudos que conectam literatura e aplicações práticas são um campo importante a ser explorado dentro da disciplina de gestão de ativos físicos.

Os resultados confirmaram algumas observações feitas pela literatura e especialistas, como a dependência de ações e diretrizes definidas pelo nível estratégico para a efetiva implementação do processo de GA. Além disso, este estudo apontou alguns dos desafios na operacionalização desse processo nas empresas de manufatura. Nesse sentido, a análise foi estendida para explorar o papel do desenvolvimento tecnológico, em particular, das tecnologias da Indústria 4.0, para apoiar a implementação do processo de GA. Essas tecnologias simplificam a integração entre áreas e atividades ao longo do ciclo de vida dos ativos, além de apoiar a disponibilidade e o acesso imediato a dados e informações para apoiar o processo de tomada de decisão (Maletič *et al.*, 2020; Brous *et al.*, 2018; Macchi *et al.*, 2018; Spüntrup e Imsland, 2018; Kans e Galar, 2016).

2.6.1 Implicações práticas

Os resultados deste estudo podem contribuir para empresas que buscam aprimorar seus processos de GA. Este estudo fornece insights sobre o processo de estruturação e implementação do processo de gestão de ativos físicos. Enquanto normas como a ISO 55001 estabelecem diretrizes e requisitos para o sistema GA, o framework proposto apoia a estruturação de um conjunto de atividades necessárias para a gestão adequada dos ativos físicos.

Portanto, os gerentes podem usar o framework proposto como uma diretriz durante o desenvolvimento do processo de GA. Além disso, os gerentes podem usar o framework em conjunto com o método proposto para avaliar o nível de adoção do processo de GA. Essa avaliação permite que os gerentes entendam e, assim, apliquem os recursos com precisão para abordar as lacunas do processo. Assim, os gestores podem alavancar esse conhecimento sobre o processo para tomar decisões sobre quais tecnologias devem ser adotadas para apoiar efetivamente a implementação do processo de GA. De acordo com Veile *et al.* (2019), as empresas devem implementar as tecnologias da Indústria 4.0 de maneira orientada e adequada para poder explorar as oportunidades e benefícios por elas entregues.

Os resultados mostram que, mesmo em empresas com alto D_R , alguns elementos do processo demandam maiores esforços, como a estruturação do fluxo de informações. A partir das discussões apresentadas, os gestores podem ter uma visão geral do processo de GA, entender os principais desafios para o seu funcionamento, além de compreender a relevância desse processo para os objetivos da organização.

2.6.2 Limitações e oportunidades de pesquisas futuras

Este estudo apresenta algumas limitações que podem ser contempladas em pesquisas futuras. Primeiramente, para a validação do framework, uma amostra de três empresas de capital intensivo em diferentes segmentos da indústria foi considerada. Tal abordagem pode ser reproduzida para avaliar as características intrínsecas de setores e empresas específicas, bem como o estudo de uma amostra maior. Além disso, este estudo não considera os efeitos da implementação do processo de gestão de ativos físicos no desempenho operacional das organizações. Assim, como oportunidade para estudos futuros, é a condução de estudos de caso que abordem a operacionalização prática do processo de GA em empresas de manufatura.

2.7 Referências

Aghabegloo, M.; Rezaie, K.; Ali Torabi, S.; Yazdani, M. (2024). "Integrating business impact analysis and risk assessment for physical asset criticality analysis: A framework for sustainable operations in process industries", *Expert Systems with Applications*, 241.

Alabdulkarim, A. A., Ball, P., and Tiwari, A. (2015), "Assessing asset monitoring levels for maintenance operations: A simulation approach", *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 26 No. 5, pp. 632-659.

Alsyouf, I.; Alsuwaidi, M.; Hamdan, S.; Shamsuzzaman, M. (2018). "Impact of ISO 55000 on organisational performance: Evidence from certified UAE firms", *TOTAL QUALITY MANAGEMENT & BUSINESS EXCELLENCE*, 32(1–2), 1–19.

Amadi-Echendu, J. E. *et al.* (2010), "What Is Engineering Asset Management?", in *Amadi-Echendu J., Brown K., Willett R., Mathew J. (eds), Definitions, Concepts and Scope of Engineering Asset Management, Engineering Asset Management Review*, Vol. 1., Springer, London, pp. 3-16.

AMC, Asset Management Council (2014), *Framework for Asset Management: Asset Management Body of Knowledge (AMBoK)*, second edition, Australia: AMC.

Braaksma, A. J. J., Veldman, J., and Vis, I. F. (2014), "Service and Life Cycle Management of engineered assets/goods", *Computers and industrial engineering*, 76, pp. 387-389.

Brous, P., Janssen, M., and Herder, P. (2018), "Internet of Things adoption for reconfiguring decision-making processes in asset management", *Business Process Management Journal*, Vol. 25 No. 3, pp. 495-511.

Campbell, J. D. (1995), "Outsourcing in maintenance management: A valid alternative to self-provision", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 1 (3), pp. 18-24.

Candón, E.; Martínez-Galán, P.; De la Fuente, A.; González-Prida, V.; Crespo Márquez, A.; Gómez, J.; Sola, A.; Macchi, M. (2019). "Implementing Intelligent Asset Management Systems (IAMS) within an Industry 4.0 Manufacturing Environment", *IFAC PapersOnLine*, 52(13), 2488–2493.

Cooper, D. R., and Schindler, P. S. (2014), *Business Research Methods*, The McGraw-Hill Companies, New York, NY.

De la Fuente, A.; González-Prida, V.; Crespo, A.; Gómez, J. F.; Guillén, A. (2018). "Advanced Techniques for Assets Maintenance Management", *IFAC PapersOnLine*, 51(11), 205–210.

El-Akruti, K. O. (2012) *The strategic role of engineering asset management in capital intensive organisations*, *Doctor of Philosophy thesis*, University of Wollongong. Available at: <http://ro.uow.edu.au/theses/3539>.

El-Akruti, K., and Dwight, R. (2013), "A framework for the engineering asset management system", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 19 Issue: 4, pp. 398-412, (2013).

El-Akruti, K., Dwight, R., and Zhang, T. (2013), “The strategic role of engineering asset management”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 146 No. 1, pp. 227-239.

Emmanouilidis, C., and Komonen, K. (2013), “Physical Asset Management Practices in Industry: Comparisons between Greece and Other EU Countries”, *Advances in Production Management Systems*, Apms, Pt Ii, 415, pp. 509–516.

Frolov, V.; Megel, D.; Bandara, W.; Sun, Y.; Ma, L. (2009), “Building an ontology and process architecture for engineering asset management”, *Proceedings of the 4th World Congresso on Engineering Asset Management*, Athens, Greece, 28-30 September.

González-Prida, V.; Márquez, C. A. (2012), “A framework for warranty management in industrial assets”, *Computers in Industry*, v. 63, pp. 960-971.

Greco, M.; Cricelli, L.; Grimaldi, M. (2013), “A strategic management framework of tangible and intangible assets,” *European Management Journal*, v. 31, pp. 55-66.

Hastings, N. A. (2010), *Physical asset management*, Springer, London, UK.

Heitz C., Goren L., and Sigrist, J. (2016), “Decision Making in Asset Management: Optimal Allocation of Resources for Maximizing Value Realization”, in *Koskinen K. et al. (eds), Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2015)*, Springer, Cham, pp. 259-268.

Hipkin, I. (2001), “Knowledge and IS implementation: case studies in physical asset management”, *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 21 No. 10, pp. 1358-1380.

Hoskins, R.P.; Brint, A.T.; Strbac, G. (1998), “A structured approach to Asset Management within the electricity industry”, *Utilities Policy*, v. 7, pp. 221-232.

IAM, (2018), *The Institute of Asset Management*, site institucional. Disponível em: <https://theiam.org> Acesso em 20 de novembro de 2018.

IBM, (2019), *Understanding the impact and value of enterprise asset management. Make smarter decisions about your assets using the Internet of Things and artificial intelligence*, IBM Corporation, Somers, NY.

ISO 55000, (2014), *Asset Management: Overview, principles and terminology*, International Organization for Standardization (ISO), Geneva.

ISO 55001, (2014), *Asset Management: Management systems-requirements*, International Organization for Standardization (ISO), Geneva.

ISO 55002, (2014), *Asset Management: Management systems-Guidelines for the application of ISO 55001*, International Organization for Standardization (ISO), Geneva.

ISO/IEC 15504-5, (2004), *Part 5: An exemplar Process Assessment Approach*, International Organization for Standardization (ISO), Geneva.

Kans, M.; Galar, D. (2016). "The Impact of Maintenance 4.0 and Big Data Analytics within Strategic Asset Management Mirka", *MPMM 2016: Maintenance Performance Measurement &*

Management. In *6th International Conference on Maintenance*.

Kelly, A. (1997), *Maintenance: Organisation and Systems*, Reed Educational and Professional Publishing Ltd, Oxford, p. 1.

Klingenberg, C. O., Borges, M. A. V., and Antunes Jr, J. A. V. (2019), "Industry 4.0 as a data-driven paradigm: a systematic literature review on technologies", *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/JMTM-09-2018-0325>

Koukias, A., and Kiritsis, D. (2015), "Rule-based mechanism to optimize asset management using a technical documentation ontology", *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 28 No. 3, pp. 1001-1006.

Macchi, M., Roda, I., Negri, E., and Fumagalli, L. (2018), "Exploring the role of Digital Twin for Asset Lifecycle Management", *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51 No. 11, pp. 790-795.

Maletič, D.; Maletič, M.; Al-Najjar, B.; Gomišček, B. (2020). "An Analysis of Physical Asset Management Core Practices and Their Influence on Operational Performance", *SUSTAINABILITY*, 12 (21), 9097.

Maletič, D., Maletič, M., Al-Najjar, B., Gotzamani, K., Gianni, M., Kalinowski, T. B., and Gomišček, B. (2017), "Contingency factors influencing implementation of physical asset management practices", *Organizacija*, Vol. 50 No.1, pp. 3-16.

Marquez, A. C.; Fernandez, J. F. G.; Fernández, P. M.-G.; Lopez, A. G. (2020). "Maintenance Management through Intelligent Asset Management Platforms (IAMP) Emerging Factors, Key Impact Areas and Data Models", *Energies*, 13 (July), 3762.

Mirzaei, M. J.; Dashti, R.; Kazemi, A.; Amirioun, M. H. (2015), "An asset-management model for use in the evaluation and regulation of public-lighting systems", *Utilities Policy*, v. 32, pp. 19-28.

Meyer, G. G., Buijs, P., Szirbik, N. B., and Wortmann, J. C. (2014), "Intelligent products for enhancing the utilization of tracking technology in transportation", *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 34 No. 4, pp. 422-446.

Aghabegloo, M.; Rezaie, K.; Ali Torabi, S.; Yazdani, M. (2024). "Integrating business impact analysis and risk assessment for physical asset criticality analysis: A framework for sustainable operations in process industries", *Expert Systems with Applications*, 241.

Alsyouf, I.; Alsuwaidi, M.; Hamdan, S.; Shamsuzzaman, M. (2018). "Impact of ISO 55000 on organisational performance: Evidence from certified UAE firms", *TOTAL QUALITY MANAGEMENT & BUSINESS EXCELLENCE*, 32(1-2), 1-19.

Candón, E.; Martínez-Galán, P.; De la Fuente, A.; González-Prida, V.; Crespo Márquez, A.; Gómez, J.; Sola, A.; Macchi, M. (2019). "Implementing Intelligent Asset Management Systems (IAMS) within an Industry 4.0 Manufacturing Environment", *IFAC PapersOnLine*, 52(13), 2488-2493.

De la Fuente, A.; González-Prida, V.; Crespo, A.; Gómez, J. F.; Guillén, A. (2018). "Advanced Techniques for Assets Maintenance Management", *IFAC PapersOnLine*, 51(11), 205-210.

Kans, M.; Galar, D. (2016). "The Impact of Maintenance 4.0 and Big Data Analytics within

Strategic Asset Management Mirka", *MPMM 2016: Maintenance Performance Measurement & Management*. In *6th International Conference on Maintenance*.

Maletič, D.; Maletič, M.; Al-Najjar, B.; Gomišček, B. (2020). "An Analysis of Physical Asset Management Core Practices and Their Influence on Operational Performance", *SUSTAINABILITY*, 12 (21), 9097.

Marquez, A. C.; Fernandez, J. F. G.; Fernández, P. M.-G.; Lopez, A. G. (2020). "Maintenance Management through Intelligent Asset Management Platforms (IAMP) Emerging Factors, Key Impact Areas and Data Models", *Energies*, 13 (July), 3762.

Msongole, S. S.; Bakuwa, R. C.; Mkandawire, B. O. B. (2022). "Assessing the level of application of physical asset management core practices at water boards in Malawi", *Heliyon*, 8(11), e11614.

Ouertani, M. Z.; Parlikad, A. K.; Mcfarlane, D. (2008), "Asset information management: Research challenges", *2008 Second International Conference on Research Challenges in Information Science*, Marrakech, Morocco, Inst. of Elec. and Elec. Eng. (IEEE), pp. 361-370.

Pacchini, A. P. T., Lucato, W. C., Facchini, F., and Mummolo, G. (2019), "The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0", *Computers in Industry*, Vol. 113, pp. 103-125.

PAS 55, (2008), *Asset Management Part 1: Specification for the optimized management of physical assets, and Asset Management Part 2: Guidelines for the application of PAS 55-1*, British Standards Institution (BSI), London.

Peffer, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., and Chatterjee, S. (2007), "A design science research methodology for information systems research", *Journal of Management Information Systems*, Vol. 24 No. 3, pp. 45-77.

Petchrompo, S., and Parlikad, A. K. (2019), "A review of asset management literature on multi-asset systems", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 181, pp. 181-201.

Qiu, X., Luo, H., Xu, G., Zhong, R., and Huang, G. Q. (2015), "Physical assets and service sharing for IoT-enabled Supply Hub in Industrial Park (SHIP)", *International Journal of Production Economics*, Vol. 159, pp. 4-15.

Roda, I., and Garetti, M. (2014), "TCO Evaluation in Physical Asset Management: Benefits and Limitations for Industrial Adoption", in *Grabot B., Vallespir B., Gomes S., Bouras A., Kiritsis D. (eds), Advances in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World. APMS 2014, IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Springer, Berlin, Vol. 440, pp. 216-223.

Roda, I., and Macchi, M. (2016), "Studying the funding principles for integrating Asset Management in Operations: an empirical research in production companies", *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 49 No. 28, pp. 1-6.

Ruitenburg, R. J., and Braaksma, A. J. J. (2017), "Evaluation of the Lifetime Impact Identification Analysis: Two tests in a changeable context", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 17, pp. 42-49.

SAE J4000, (2001), *Identification and Measurement of Best Practice in Implementation of Lean Operation*, Society of Automotive Engineers (SAE), Warrendale, PA.

Schuman, C. A., and Brent, A. C. (2005), "Asset life cycle management: Towards improving physical asset performance in the process industry", *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 25 No. 6, pp. 566-579.

Spüntrup, F. S., and Imsland, L. (2018), "Asset fleet management in the process industry - a conceptual model", *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51 No. 18, pp. 281-286.

Taylor, W. B. (1981), "The use of life cycle costing in acquiring physical assets", *Long Range Planning*, Vol. 14 No. 6, pp. 32-43.

Trappey, A. J.C.; Trappey, C. V.; Mac, L.; Chang, J. C. M. (2015), "Intelligent engineering asset management system for power transformer maintenance decision supports under various operating conditions", *Computers & Industrial Engineering*, v. 84, pp. 3-11.

Valitov, S. M.; Myznikova, M. N.; Bannikova, A. A. (2015), "Modernization projects in the power industry: performance evaluation", *Procedia Economics and Finance*, v. 24, pp. 722-726.

Veile, J. W., Kiel, D., Müller, J. M., and Voigt, K., "Lessons learned from Industry 4.0 implementation in the German manufacturing industry", *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2018-0270>

3 ARTIGO 2 – Gestão de ativos físicos sob a perspectiva da tomada de decisão

Rodrigo Pessotto Almeida
Francisco José Kliemann Neto

Resumo

A gestão de ativos como uma função de gestão, embora recente, tem se tornado cada vez mais relevante no contexto prático para o ambiente dos negócios e acadêmico. Conforme mostra a literatura, a discussão acerca da gestão de ativos no contexto de empresas de capital intensivo ainda carece de estudos integrando teoria e prática. Assim, o objetivo desta pesquisa consiste em investigar o processo de tomada de decisão da gestão de ativos, explorando as oportunidades trazidas pelo avanço tecnológico, em empresas com emprego intensivo de ativos físicos. Desta forma, esse trabalho apresenta um estudo de caso com três empresas multinacionais de capital intensivo, localizadas no Brasil. Os resultados mostram a relevância do processo de tomada de decisão para o desempenho dos sistemas de gestão e dos ativos. Além de compreender o processo e identificar algumas dificuldades enfrentadas pelas empresas para a gestão de seu portfólio de ativos, principalmente pela complexidade de suas operações, este estudo também aponta alguns desafios e oportunidades trazidas pelo avanço tecnológico. Muitas das tecnologias trazidas pelo movimento da Indústria 4.0 oferecem soluções para as dificuldades observadas no processo de gestão de ativos como, por exemplo, tecnologias de integração e de suporte ao processo de tomada de decisão, que se traduzem em melhorias na gestão e desempenho dos ativos físicos. Por fim, o estudo apresenta uma extensa discussão acerca do processo de tomada de decisão da gestão de ativos a partir dos elementos de análise avaliados.

Palavras-chave: Gestão de ativos; Gestão de ativos físicos; Tomada de decisão; Indústria 4.0; Tecnologias Indústria 4.0; Empresas de capital intensivo.

Abstract

Asset management as a management function, although recent, has become increasingly relevant in the practical context for the business and academic environment. As the literature shows, the discussion about asset management in the context of capital-intensive companies still lacks studies integrating theory and practice. Thus, this research investigates the asset management decision-making process, exploring the opportunities brought by technological advancement in companies with intensive use of physical assets. Therefore, this study presents a case study with three capital-intensive multinational companies located in Brazil. The results show the relevance of the decision-making process to the performance of the management systems and assets. In addition to understanding the process and identifying some difficulties companies face in managing their asset portfolio, mainly due to the complexity of their operations, this study also points out some challenges and opportunities brought about by technological advances. Many of the technologies brought about by the industry 4.0 movement offer solutions to the difficulties observed in the asset management process, such as integration and support technologies for the decision-making process, which translate into improvements in managing and performance of physical assets. Finally, the study presents an extensive discussion about the asset management decision-making process based on the evaluated analysis elements.

Keywords: Asset management, Physical asset management, Decision-making, Industry 4.0, Industry 4.0 technologies, Capital-intensive companies.

3.1 Introdução

Na visão de Porter (1998), uma empresa consiste em um conjunto de atividades discretas executadas para a concepção, produção, comercialização, entrega e suporte de seus produtos e serviços. Estas atividades podem ser representadas utilizando o conceito de cadeia de valor, que contempla o conjunto de atividades realizadas por uma empresa para criar valor a seus clientes. Por outro lado, cada atividade da cadeia de valor envolve custos de operações, ativos físicos e capital de trabalho. Assim, uma empresa é rentável se o valor gerado para seus clientes excede os custos envolvidos na criação do produto ou serviço (Porter, 1998). Neste sentido, organizações que consigam equilibrar menores custos operacionais com a utilização de seu portfólio de ativos podem alcançar um nível de desempenho mais competitivo (IBM, 2016; Maletič *et al.*, 2020; Aghabegloo *et al.*, 2024).

Em setores que apresentam uso intensivo de ativos, como o setor da manufatura, o desempenho dos ativos físicos apresenta relação direta com a qualidade e o custo dos produtos e serviços, que por consequência definem o nível de satisfação do cliente (IBM, 2016; Maletič *et al.*, 2020). Deste modo, estas organizações são desafiadas a maximizar o valor fornecido pelos ativos ao longo de seu ciclo de vida (IBM, 2016; Maletič *et al.*, 2020). A necessidade de atribuir ativos às atividades faz com que a quantidade e a eficiência na utilização destes sejam determinantes do custo da atividade. Assim, o gerenciamento eficaz dos ativos físicos apresenta papel relevante para a competitividade do negócio (Hampapur *et al.*, 2011; Maletič *et al.*, 2017; Maletič *et al.*, 2020; Aghabegloo *et al.*, 2024).

Nas organizações altamente dependentes dos ativos para entregar produtos e serviços, o tema gestão de ativos físicos (*Physical Asset Management* - PAM) tem se tornado um desafio-chave, assumindo o *status* de função de gestão não tida até então (Emmanouilidis e Komonen, 2013; Maletič *et al.*, 2017; Maletič *et al.*, 2020; Msongole *et al.*, 2022). Este aumento no interesse sobre o tema, na academia e indústria, está relacionado à relativamente recente publicação dos padrões normativos da série ISO 55000 para gestão de ativos (Alsyouf *et al.*, 2018; Petchrompo e Parlikad, 2019). No entanto, a gestão de ativos como disciplina e processo de negócio ainda está em seu estágio inicial em termos de debate científico (Roda e Macchi, 2016; Aghabegloo *et al.*, 2024).

Além de estimular a obtenção de valor dos ativos, a gestão de ativos fornece suporte a este processo de geração de valor. Ela promove atividades e procedimentos sistematizados e coordenados com os quais uma organização gerencia de forma otimizada seus ativos físicos, estabelecendo a melhor relação entre custo, risco e desempenho (Mitchell, 2006; ISO 55000: 2014; Petchrompo e Parlikad, 2019; Aghabegloo *et al.*, 2024). Neste sentido, as organizações precisam lidar com os desafios de acompanhar, avaliar e gerenciar constantemente a confiabilidade e o desempenho de uma ampla variedade de ativos físicos existentes em suas operações (IBM, 2016; Kans e Galar, 2016). Para alcançar este desafio, as organizações precisam estruturar um processo integrado de gestão de ativos, abrangendo os níveis operacional, tático e estratégico (El-Akruti *et al.*, 2013; Qiu *et al.*, 2015; Maletič *et al.*, 2020). Esta estruturação do processo de gestão de ativos pode ser orientada pela adoção de padrões normativos como, por exemplo, a série de normas ISO 55000 (Roda e Garetti, 2014; Alsyouf *et al.*, 2018; Petchrompo e Parlikad, 2019). Por outro lado, as organizações também precisam estabelecer um processo de tomada de decisão orientado por fatores técnicos, financeiros e econômicos (Hastings, 2010; Ruitenburg e Braaksma, 2017; Marquez *et al.*, 2020), assegurando que investimentos realizados nesses ativos forneçam, além de desempenho operacional, um retorno econômico-financeiro adequado.

Dentre outros aspectos que formam a gestão de ativos, o estabelecimento do processo de tomada de decisão relacionado aos ativos assume papel relevante (El-Akruti *et al.*, 2013; Macchi *et al.*, 2018; Marquez *et al.*, 2020). Este processo requer a adoção de ferramentas que suportem a tomada de decisão a partir de uma visão holística do processo de gestão de ativos (Schuman e Brent, 2005; El-Akruti *et al.*, 2013; Maletič *et al.*, 2020; Aghabegloo *et al.*, 2024). Para Brous *et al.* (2018) Candón *et al.* (2019), a gestão de ativos constitui um processo de negócio altamente dependente de grandes quantidades de dados, dos quais podem ser extraídas informações de suporte à tomada de decisão ao longo de todo o ciclo de vida dos ativos. Para Hipkin (2001) e Candón *et al.* (2019), as atividades da gestão de ativos dependem da integração de sistemas e processos existentes, bem como da disponibilidade de dados e informações. Diante disso, surge o desafio de garantir que a tomada de decisão seja orientada por uma base de informações adequada, o que pressupõe a gestão adequada de dados e informações (Ouertani *et al.*, 2008; Macchi *et al.*, 2018; Marquez *et al.*, 2020), tanto técnicas quanto econômicas.

Embora seja um tema recente, a questão relacionada à gestão de informações vem sendo discutida há bastante tempo na literatura sobre gestão de ativos (Hipkin, 2001; Brown e Humphrey, 2005; Ouertani *et al.*, 2008; Borek *et al.* 2014; Macchi *et al.*, 2018; Candón *et al.*, 2019). Com os recentes avanços tecnológicos este tema foi retomado, em função dos impactos, oportunidades e da relevância assumida pelos dados e informações para a gestão de ativos (Brous *et al.*, 2018; Macchi *et al.*, 2018; Marquez *et al.*, 2020). A gestão de ativos impulsionada por dados e informações, a partir, por exemplo, da adoção de tecnologias da Indústria 4.0, pode trazer impactos significativos para as organizações (IBM, 2016; Spüntrup e Imsland, 2018).

Portanto, o processo de gestão de ativos é intensivo em tomada de decisões ao longo de suas atividades, e inicialmente envolve decisões de investimentos, seguido de decisões relacionadas à operação e manutenção até a decisão de renovação, substituição ou desativação desses ativos (Heitz *et al.*, 2016; Marquez *et al.*, 2020). Estas decisões ao longo do ciclo de vida dos ativos devem envolver os níveis estratégico, tático e operacional (El-Akruti *et al.*, 2013; Macchi *et al.*, 2018).

Diante disso, o artigo explora os aspectos relacionados à tomada de decisão dentro do processo de gestão de ativos físicos, com particular ênfase aos aspectos relativos à avaliação de investimentos a serem realizados. O objetivo deste estudo é investigar a estrutura do processo de tomada de decisão da gestão de ativos físicos, contemplando particularmente oportunidades e transformações trazidas pelo advento da Indústria 4.0. Neste sentido, é conduzido um estudo de caso em três empresas multinacionais no Brasil que apresentam emprego intensivo de capitais em suas operações. A partir de uma abordagem colaborativa entre literatura e prática é possível compreender e avaliar o fluxo de informações dentre os níveis hierárquicos do processo de gestão de ativos, para suportar a tomada de decisão no nível estratégico. Com o estudo também foram identificados desafios e oportunidades para a estruturação do processo de tomada de decisão no contexto em estudo.

De forma a atingir os objetivos propostos, este artigo é dividido em 7 seções. Além desta seção, as seções 2 e 3 apresentam a revisão da literatura e o modelo conceitual. Na seção 4 é detalhado o método de pesquisa aplicado para condução desta pesquisa. A seção 5 traz os resultados deste estudo, enquanto a seção 6 apresenta a discussão destes resultados. Por fim, na última seção são apresentadas as conclusões, limitações e direcionamentos para pesquisas futuras.

3.2 Gestão de ativos

Gestão de ativos é um termo amplamente utilizado em finanças, na alocação de recursos e em uma série de outras áreas para maximizar a utilização e retorno destes ativos, principalmente financeiros (Mitchell, 2006). Igualmente, este termo é adotado por organizações para descrever o processo e atividades empregadas para o gerenciamento dos ativos físicos existentes em suas operações (Mitchell, 2006; Hastings, 2010; Alsyouf *et al.*, 2018; Aghabegloo *et al.*, 2024).

3.2.1 Gestão de ativos físicos

A partir da publicação dos padrões normativos da série ISO 55000 o conceito de gestão de ativos ganhou ainda mais relevância nos ambientes de negócios e acadêmico (El-Akruti *et al.*, 2013; Emmanouilidis e Komonen, 2013; Backman e Helaakoski, 2016; Maletič *et al.*, 2017; Alsyouf *et al.*, 2018; Macchi *et al.*, 2018; Petchrompo e Parlikad, 2019). Apesar de poder ser aplicada a outros tipos de ativos como, por exemplo, financeiros, humanos e informacionais, esta série de normas destina-se essencialmente à gestão de ativos físicos. Assim, quando empregado o termo “gestão de ativos” nesta pesquisa este equivale ao conceito de gestão de ativos físicos como, por exemplo, máquinas, veículos e equipamentos.

Além de aspectos operacionais como confiabilidade, disponibilidade e manutenção dos ativos, a gestão de ativos apresenta uma abordagem holística, incluindo elementos estratégicos, mensuração de riscos, segurança, meio ambiente e fatores humanos (Amadi-Echendu *et al.*, 2007; Frolov *et al.*, 2010; Maletič *et al.*, 2017; Maletič *et al.*, 2020). Embora na literatura e no campo profissional sejam priorizadas abordagens relacionadas ao ciclo de vida dos ativos, o processo de gestão de ativos possui natureza interdisciplinar e colaborativa (Hastings, 2010; Maletič *et al.*, 2020). Neste sentido, El-Akruti *et al.* (2013) e Aghabegloo *et al.* (2024) destacam que a necessidade de uma visão ampliada da gestão de ativos no contexto organizacional foi identificada, porém ainda precisa ser desenvolvida.

A gestão de ativos estimula a organização a obter o máximo valor de seus ativos (Hastings, 2010; ISO 55000: 2014; Maletič *et al.*, 2020). Além disso, a gestão de ativos fornece

suporte à realização de valor estabelecendo a melhor relação entre fatores financeiros, custos ambientais e sociais, riscos, qualidade dos serviços e desempenho relacionado aos ativos físicos (ISO 55000: 2014; Backman e Helaakoski, 2016; Maletič *et al.*, 2020). Deste modo, a gestão de ativos promove melhorias na confiabilidade do sistema de ativos, redução nos custos de operações e entrega de benefícios na forma de desempenho dos ativos para as organizações e seus *stakeholders* (Petchrompo e Parlikad, 2019). Também é função da gestão de ativos garantir que a mudança nos requisitos de negócio seja acompanhada de forma otimizada pela base de ativos físicos (Emmanouilidis e Komonen, 2013). Objetivamente, a gestão de ativos pode ser entendida como uma estratégia corporativa que visa equilibrar desempenho, custo e risco em relação aos seus ativos (Brown e Humphrey, 2005; ISO 55000: 2014). Para alcançar esse equilíbrio requer o apoio de três pilares de competência: gerenciamento, engenharia e informação (Brown e Humphrey, 2005).

A partir do pilar de informação, Brous *et al.* (2018) e Marquez *et al.* (2020) destacam a gestão de ativos como um processo de negócio dependente de dados dos quais são extraídas informações que fornecem suporte à tomada de decisões durante o ciclo de vida dos ativos. Assim, informações devem suportar decisões a partir da perspectiva atual da gestão de ativos de orientação aos objetivos do negócio (Brous *et al.*, 2018). Estas decisões envolvem questões como identificar quais ativos são necessários, avaliar requisitos financeiros, avaliar os investimentos necessários, realizar a aquisição de ativos, fornecer sistemas para suporte logístico e de manutenção para os ativos, e decidir sobre a disposição ou renovação dos ativos, de forma a atingir de maneira efetiva e eficiente os objetivos do negócio (Brown e Humphrey, 2005; Hastings, 2010; Brous *et al.*, 2018). Deste modo, o processo de tomada de decisão da gestão de ativos precisa assegurar o alinhamento entre requisitos estratégicos, gerenciais e técnicos (Brown e Humphrey, 2005; El-Akruti *et al.*, 2013; Marquez *et al.*, 2020).

3.2.2 Tomada de decisão na gestão de ativos

A partir de uma ampla revisão da literatura sobre gestão de ativos (Taylor, 1981; Schuman e Brent, 2005; Ouertani *et al.*, 2008; Hastings, 2010; El-Akruti, 2012; El-Akruti e Dwight, 2013; El-Akruti *et al.*, 2013; Emmanouilidis e Komonen, 2013; Greco *et al.*, 2013; ISO 55000: 2014; Roda e Garetti 2014; Roda e Macchi, 2016; Maletič *et al.*, 2017; Alhazmi,

2018; Brous *et al.*, 2018; Macchi *et al.*, 2018; Petchrompo e Parlikad, 2019; Marquez *et al.*, 2020; Aghabegloo *et al.*, 2024), é possível compreender o desenvolvimento e a crescente relevância recebida pelo conceito de gestão de ativos, principalmente para empresas com emprego intensivo de ativos. Esta revisão também fornece orientações em termos dos fundamentos para estruturação do processo de tomada de decisão que orienta a gestão de ativos. Para Roda e Macchi (2016), as decisões da gestão de ativos podem ser classificadas em termos de duas dimensões: a fase do ciclo de vida do ativo (Schuman e Brent, 2005; Ouertani *et al.*, 2008; Maletič *et al.*, 2020) e o nível hierárquico das atividades de controle dos ativos (El-Akruti, 2012; El-Akruti e Dwight, 2013; El-Akruti *et al.*, 2013; Marquez *et al.*, 2020). Segundo Roda e Macchi (2016), essas duas dimensões devem ser avaliadas segundo quatro princípios: orientação ao ciclo de vida, orientação ao sistema de ativos, orientação a riscos e orientação centrada no ativo.

Inicialmente as decisões podem ser classificadas em termos do nível hierárquico de controle, que pode ser operacional, tático ou estratégico (El-Akruti, 2012; El-Akruti e Dwight, 2013; El-Akruti *et al.*, 2013; Roda e Macchi, 2016; Macchi *et al.*, 2018; Marquez *et al.*, 2020). Simultaneamente estas decisões podem ser classificadas em termos da fase do ciclo de vida do ativo, que inclui o início da vida, o meio da vida e o final da vida do ativo (Schuman e Brent, 2005; Ouertani *et al.*, 2008; Roda e Macchi, 2016; Macchi *et al.*, 2018; Maletič *et al.*, 2020). Deste modo, as decisões relacionadas aos ativos apresentam nove classificações a partir da combinação entre os três estágios do ciclo de vida e os três níveis de controle dos ativos (Roda e Macchi, 2016; Macchi *et al.*, 2018).

A adoção da orientação ao ciclo de vida faz com que a tomada de decisão seja baseada em objetivos de longo prazo e desempenho ao longo da vida do ativo (Roda e Macchi, 2016). Neste sentido, a literatura apresenta algumas ferramentas que auxiliam esta abordagem, como *Life Cycle Cost* (LCC) (Schuman e Brent, 2005) e *Total Cost of Ownership* (TCO) (Roda e Garetti, 2014). Por outro lado, diversas atividades organizacionais, envolvendo os níveis estratégico, tático e operacional, precisam ser executadas de forma colaborativa ao longo dos diferentes estágios do ciclo de vida dos ativos (El-Akruti, 2012; El-Akruti e Dwight, 2013; El-Akruti *et al.*, 2013; Maletič *et al.*, 2020).

Já a orientação ao sistema de ativos estabelece uma visão sistemática visando identificar e dirigir esforços às atividades relevantes para assegurar a geração de valor fornecida

pelos ativos, que levam ao alcance dos objetivos organizacionais (Roda e Macchi, 2016; Aghabegloo *et al.*, 2024). Além de lidar com diferentes tipos de ativos, esta complexidade é ainda maior, pois cada ativo pode ser formado por diversos componentes interagindo entre si (Kans e Galar, 2016). Deste modo, a interação e o estado destes componentes determinam tanto o estado quanto o desempenho do sistema. Assim, o processo de gestão de ativos deve assegurar que os efeitos sistêmicos de uma decisão pontual sejam considerados na tomada de decisão (Kans e Galar, 2016; Roda e Macchi, 2016).

Outro aspecto é o processo de decisão possuir orientação a riscos, avaliando custos e benefícios associados a cada decisão. Segundo Roda e Macchi (2016) e Aghabegloo *et al.* (2024), a falha de ativos críticos provoca grande impacto no negócio das organizações. Deste modo, técnicas multidisciplinares são requeridas para que sejam considerados todos os aspectos de riscos relacionados ao desempenho dos ativos (Roda e Macchi, 2016).

Assim, a gestão de ativos é altamente dependente do conhecimento dos ativos da organização, do papel destes ativos para o negócio e das projeções futuras do negócio (Roda e Macchi, 2016; Kans e Galar, 2016). A partir deste conhecimento, os gestores conseguem alinhar decisões com as necessidades do negócio (Hastings, 2010). Brown e Humphrey (2005) observam que a criação de uma base de registros onde estão todos os dados sobre os ativos e componentes é fundamental para a gestão de ativos. Esta base de dados deve ter rastreadas informações relacionadas ao desempenho econômico e técnico ao longo de todo o ciclo de vida dos ativos (Brown e Humphrey, 2005). Assim, a base de registro de dados dos ativos fornece informações para suportar decisões nos níveis estratégico, tático e operacional (Kans e Galar, 2016; Roda e Macchi, 2016).

Para fornecer esse suporte ao processo de tomada de decisão, o primeiro desafio é integrar diversos tipos de informações, que geralmente encontram-se dispersas em várias fontes (Macchi *et al.*, 2018; Candón *et al.*, 2019; Marquez *et al.*, 2020). Outro aspecto apontado pelos autores em relação ao processo de tomada de decisão é o elevado tempo gasto para acessar estas informações. A dificuldade de acesso ou até mesmo a falta de informações pode provocar inconsistências na tomada de decisão (Hastings, 2010; Roda e Macchi, 2016; Macchi *et al.*, 2018; Marquez *et al.*, 2020).

Atualmente as iniciativas de gestão de ativos coletam e armazenam uma grande quantidade de dados das operações, porém raras vezes estes dados são utilizados (Campos *et*

al., 2017; Maletič *et al.*, 2020; Marquez *et al.*, 2020). A não utilização destes dados acarreta a perda de potenciais benefícios em termos de eficiência e desempenho dos ativos. Assim, a análise dos dados coletados das operações é extremamente relevante para melhorar a tomada de decisão (Campos *et al.*, 2017; Marquez *et al.*, 2020). Neste sentido, inúmeras são as oportunidades trazidas pelas tecnologias da informação e comunicação, exigindo que as empresas entendam as diversas características para desenvolver, implementar e usar estas tecnologias adequadamente em suas operações (Campos *et al.*, 2017). Além de benefícios operacionais como, por exemplo, flexibilidade, rastreabilidade e adaptabilidade, as tecnologias da Indústria 4.0 fornecem às empresas a capacidade de coletar e analisar grandes quantidades de dados em tempo real, que promovem melhorias relevantes na tomada de decisão nos níveis estratégico, tático e operacional (Kagermann *et al.*, 2013; Porter e Heppelmann, 2014; Dalenogare *et al.*, 2018; Maletič *et al.*, 2020; Marquez *et al.*, 2020).

3.3 Modelo conceitual da tomada de decisão na gestão de ativos

Segundo Porter (1998), a estrutura organizacional, ao explorar semelhanças entre o seu conjunto de atividades, acaba agrupando estas em departamentos. Por outro lado, estes departamentos são separados das demais unidades organizacionais. Deste modo, a estrutura organizacional precisa estabelecer mecanismos de maneira a equilibrar benefícios de separação e integração. Estes fatores são relevantes para a função gestão de ativos, que pressupõe uma abordagem multidisciplinar, envolvendo diversas áreas e departamentos dentro da organização (Emmanouilidis e Komonen, 2013; Marquez *et al.*, 2020), conforme ilustrado na Figura 1.

A partir desta visão holística, a configuração do modelo de tomada de decisão organizacional tem como objetivo promover a eficácia da organização, ao mesmo tempo em que estabelece o balanço dos impactos provocados pelas decisões em termos operacional, financeiro, econômico e patrimonial (Catelli *et al.*, 2003). A dimensão operacional avalia o impacto das decisões no desempenho das operações em termos de eficiência e produtividade. Esta perspectiva envolve questões como, por exemplo, qualidade e quantidade de recursos consumidos e bens e serviços gerados, com os prazos de produção e entrega. A gestão do impacto financeiro das decisões é abordada pela dimensão financeira, que avalia questões como a utilização de recursos financeiros e a administração dos prazos de pagamento e recebimento

em função dos juros e outros custos de capital (Catelli *et al.*, 2003). Já a dimensão econômica promove a integração do fluxo produtivo e financeiro no fluxo de custos e receitas, os quais fornecem o resultado econômico da decisão (Catelli *et al.*, 2003). Por fim, a dimensão patrimonial avalia os impactos na estrutura patrimonial, ativos e passivos, da empresa. Esta dimensão adota o princípio de que o resultado econômico corresponde a uma diferença no patrimônio da empresa (Catelli *et al.*, 2003).

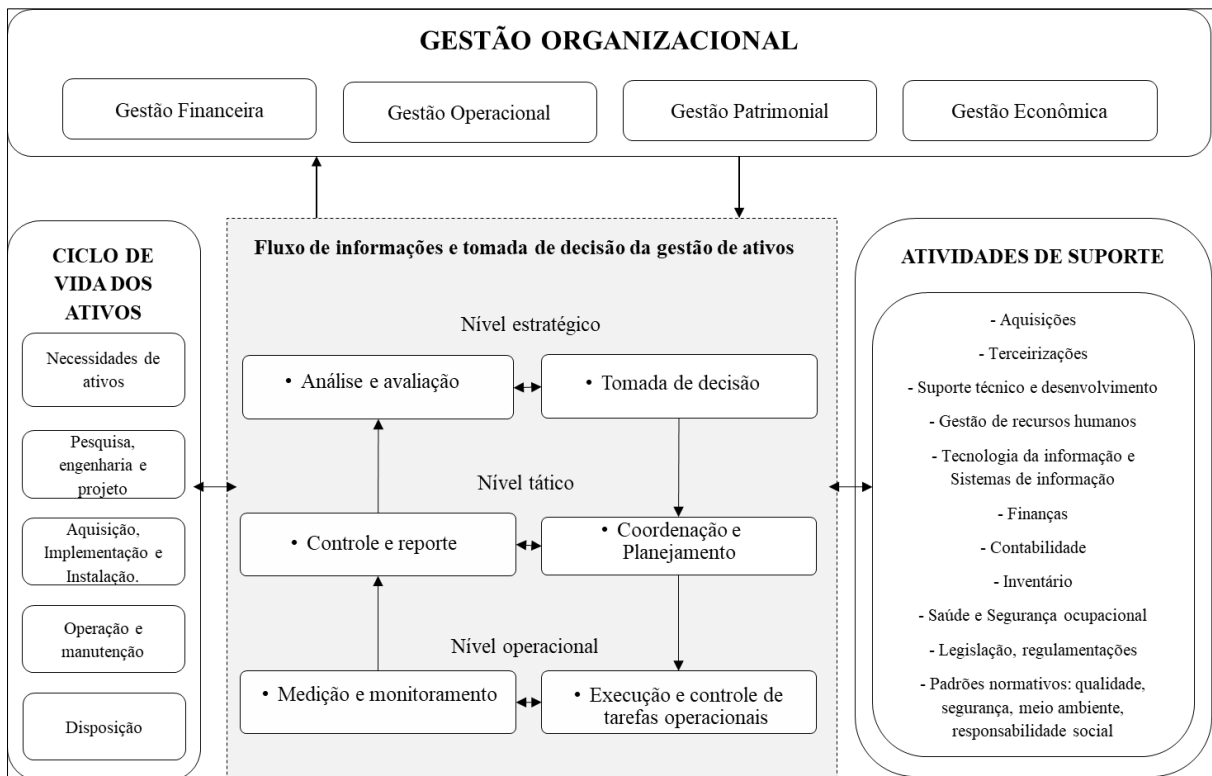


Figura 1: Fluxo de informações da gestão de ativos no contexto organizacional
Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir desta visão multidisciplinar corporativa e estratégica da gestão organizacional é desdobrado o processo de gestão de ativos, que constitui um sistema de controle colaborativo envolvendo atividades nos níveis estratégico, tático e operacional (Emmanouilidis e Komonen, 2013; El-Akruti *et al.*, 2013; Marquez *et al.*, 2020). Conforme Porter (1998), as atividades de uma empresa são classificadas em atividades primárias e atividades de suporte. Do mesmo modo, as atividades do processo de gestão de ativos incluem aquelas diretamente relacionadas com o ciclo de vida dos ativos (Taylor, 1981; Schuman e Brent, 2005; Ouertani *et al.*, 2008; Hastings, 2010; El-Akruti *et al.*, 2013; Maletič *et al.*, 2020) e atividades de suporte (Hastings, 2010; El-Akruti, 2012; El-Akruti e Dwight, 2013; El-Akruti *et al.*, 2013). A Figura 2 apresenta o fluxo de informações do processo de gestão de ativos. Assim como os demais sistemas de

gestão da organização, a gestão de ativos deve fornecer continuamente informações e receber orientações do nível estratégico e de políticas corporativas que envolvem a gestão organizacional, de modo a atender os objetivos do negócio. Segundo Hastings (2010) e Marquez *et al.* (2020), a estratégia de ativos deve responder e interagir com a estratégia de negócios. Além disso, a estrutura de gestão de ativos deve estabelecer o relacionamento em termos do fluxo de informações com as atividades do ciclo de vida e atividades de suporte.

A partir destas observações da literatura é possível estabelecer dois elementos de análise, a serem validados com o estudo de caso proposto neste trabalho:

E1. *Organizações de capital intensivo definem a integração da gestão de ativos, atividades do ciclo de vida dos ativos e atividades de suporte dentro do contexto organizacional.*

E2. *O modelo conceitual apresentado para o fluxo de informações da gestão de ativos dentro do contexto organizacional é compatível com as práticas e necessidades atuais das organizações de capital intensivo.*

O elemento de análise E1 busca verificar qual a abordagem adotada pelas organizações para orientar a gestão de ativos dentro do contexto organizacional. Objetivamente, este elemento avalia o entendimento das organizações em relação à inserção e integração da gestão de ativos dentro do contexto da organização, bem como os relacionamentos deste processo com as atividades do ciclo de vida e atividades de suporte. Por outro lado, o elemento E2 avalia a compatibilidade e aplicabilidade do modelo conceitual no ambiente organizacional.

A partir do entendimento das relações da gestão de ativos dentro do contexto organizacional, o passo seguinte a ser explorado é a configuração do processo de gestão de ativos em termos do fluxo de informações e tomada de decisão. A Figura 2 ilustra a dinâmica do fluxo de informações e tomada de decisão envolvendo os níveis estratégico, tático e operacional (El-Akruti, 2012; Emmanouilidis e Komonen, 2013; El-Akruti *et al.*, 2013; Roda e Macchi, 2016; Macchi *et al.*, 2018). Deste modo, passa a ser relevante que as organizações estabeleçam um sistema para gerenciar o fluxo de informações entre estes níveis hierárquicos (Hipkin, 2001; Amadi-Echendu *et al.*, 2007; Macchi *et al.*, 2018; Marquez *et al.*, 2020).

No nível estratégico são tomadas as decisões da gestão de ativos baseadas em orientações de necessidades do negócio e *feedback* de desempenho fornecido pelo nível tático. Por outro lado, o nível estratégico fornece orientações para as atividades de planejamento no nível tático (El-Akruti, 2012; El-Akruti *et al.*, 2013). A partir destas orientações o planejamento

da gestão de ativos fornece o plano operacional a ser executado no nível operacional. O nível tático também recebe informações do desempenho fornecidas pelo nível operacional, as quais orientam as atividades de planejamento e permitem avaliar o nível de conformidade com os requisitos de desempenho da organização. Baseado nesta avaliação, o nível tático fornece informações ao nível estratégico para suportar o processo de avaliação de desempenho (El-Akruti, 2012; El-Akruti *et al.*, 2013). Além de executar o plano de gestão de ativos, o nível operacional coleta e reporta os dados de desempenho técnico para o nível tático (El-Akruti *et al.*, 2013).

Com estas observações da literatura, um terceiro elemento de análise foi avaliado no estudo de caso:

E3. Organizações de capital intensivo estabelecem e gerenciam o fluxo de informações da gestão de ativos entre os níveis estratégico, tático e operacional.

O elemento de análise E3 tem como objetivo avaliar como as organizações de capital intensivo estabelecem e gerenciam o fluxo de informações do processo de gestão de ativos. A investigação deste elemento ao longo do estudo de caso permite estender a análise e avaliar quais são as informações trocadas entre as interfaces dos níveis estratégico, tático e operacional.

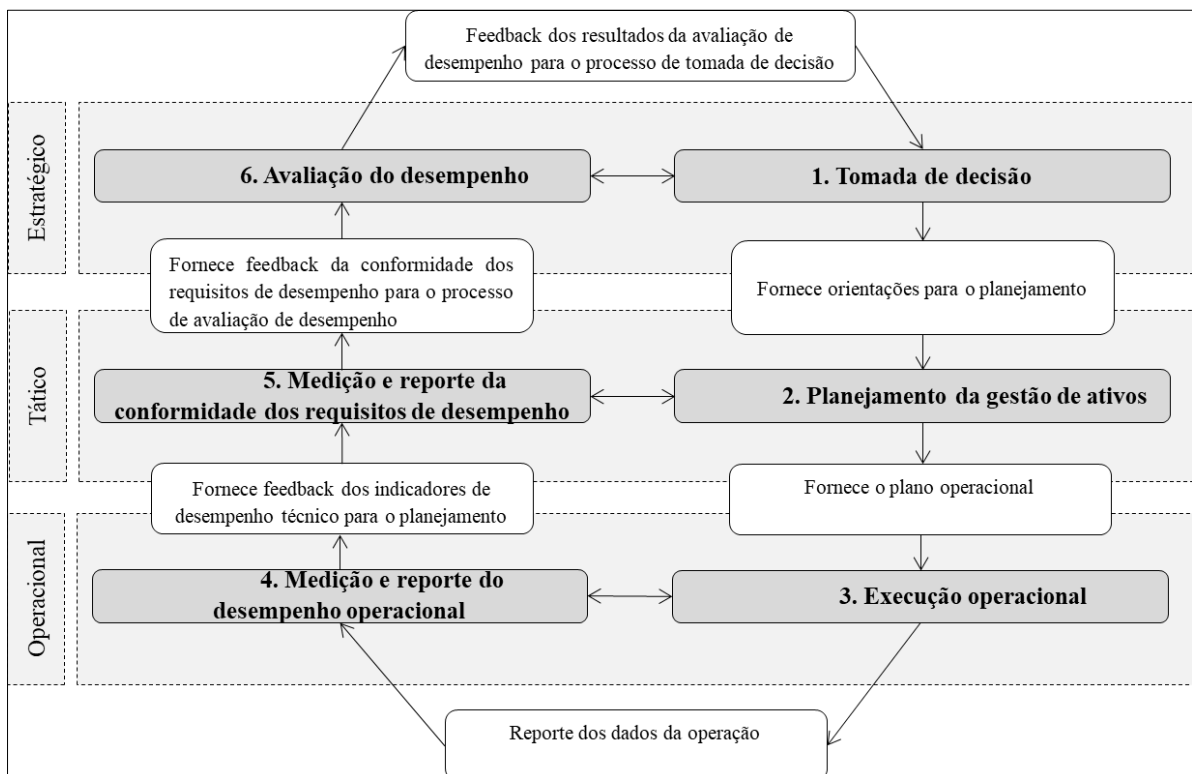


Figura 2: Fluxo de informações entre os níveis hierárquicos ao longo do processo de gestão de ativos
Fonte: Elaborado pelos autores.

Com a compreensão do fluxo de informações, o próximo estágio é avaliar diretamente as características da tomada de decisão no processo de gestão de ativos. Conforme observado pela literatura, além dos aspectos do ciclo de vida (Schuman e Brent, 2005; Ouertani *et al.*, 2008; Hasting, 2010; El-Akruti *et al.*, 2013; Maletič *et al.*, 2020) e níveis hierárquicos (Emmanouilidis e Komonen, 2013; El-Akruti *et al.*, 2013; Marquez *et al.*, 2020), a tomada de decisão deve considerar simultaneamente alguns princípios, conforme Figura 3. Roda e Macchi (2016) e Macchi *et al.* (2018) definem quatro princípios que devem orientar a tomada de decisão no processo de gestão de ativos: orientação ao ciclo de vida, orientação ao sistema de ativos, orientação ao risco e orientação centrada nos ativos.

A partir destas colocações, um quarto elemento de análise foi definido:

E4. *A tomada de decisão da gestão de ativos em organizações de capital intensivo é orientada pelos quatro princípios (orientação a riscos, ciclo de vida, sistemas e ativos), e pelos aspectos de ciclo de vida e níveis hierárquicos de controle dos ativos.*

A investigação do elemento de análise E4 ao longo do estudo de caso permite compreender quais são as perspectivas que orientam a tomada de decisão relacionada aos ativos em empresas de capital intensivo. Além disso, a abordagem dos aspectos das fases do ciclo de vida dos ativos e os níveis hierárquicos de controle dos ativos permitem verificar se as organizações diferenciam os tipos de decisões ao longo do processo de gestão de ativos.

		Orientação														
		Riscos			Ativos			Ciclo de vida			Sistema					
		Início	Meio	Fim	Início	Meio	Fim	Início	Meio	Fim	Início	Meio	Fim			
Nível hierárquico	Estratégico															
	Tático															
	Operacional															
		Fases do ciclo de vida do ativo			Fases do ciclo de vida do ativo			Fases do ciclo de vida do ativo			Fases do ciclo de vida do ativo					

Figura 3: Princípios e fundamentos para orientar a tomada de decisão na gestão de ativos

Fonte: Elaborado pelos autores.

Mediante o exposto, os quatro elementos permitem explorar a estruturação atual do processo de gestão de ativos físicos dentro do contexto organizacional. De maneira geral, o elemento E1 avalia o nível de integração e compreensão do processo de gestão de ativos físicos dentro da estrutura organizacional. Do mesmo modo, o elemento E2 avalia o nível de compatibilidade do modelo conceitual proposto para com as necessidades destas organizações.

Já E3 explora os aspectos relacionados ao fluxo de informações do processo de gestão de ativos entre os níveis estratégico, tático e operacional. Por fim, E4 investiga os fatores que orientam a tomada de decisão ao longo do processo de gestão de ativos. A próxima seção apresenta o método de pesquisa aplicado para a condução deste estudo.

3.4 Procedimentos metodológicos

Esta pesquisa apresenta uma abordagem qualitativa baseada em uma extensa revisão da literatura e em sessões de *brainstorming* com especialistas da indústria e academia para identificar e estabelecer os fundamentos para a condução do estudo de caso. Em termos de seus objetivos esta pesquisa pode ser considerada como exploratória, uma vez que explora a tomada de decisão no processo de gestão de ativos através da investigação de alguns elementos de análise (Emmanouilidis e Komonen, 2013). A partir da compreensão dos fundamentos da gestão de ativos são estabelecidos os próximos passos da pesquisa, além de explorar orientações para estruturar o processo de tomada de decisão da gestão de ativos em empresas de capital intensivo. De forma a compreender este processo organizacional, o método de pesquisa escolhido foi o estudo de caso. Com a aplicação do estudo de caso é possível avaliar os elementos de análise a partir da aplicação da técnica retrodutiva (El-Akruti e Dwight 2010). A partir da condução de um estudo de caso múltiplo foi possível avaliar aspectos da integração, do fluxo de informações e a orientação do processo de tomada de decisão da gestão de ativos, em empresas de capital intensivo.

Foram selecionadas três empresas multinacionais com emprego intensivo de ativos em suas operações. Conforme destacado por Roda e Macchi (2016), apenas empresas com certo nível de maturidade em gerenciamento de manutenção estão prontas o suficiente para discutir e implementar o conceito de gestão de ativos. Assim, foram selecionadas empresas pertencentes a diferentes setores industriais, líderes em seu setor de atuação, de forma que foi confirmada a presença de um nível avançado do conceito de gestão da manutenção, porém com diferentes níveis de iniciação em termos do processo de gestão de ativos.

Para a coleta de dados foram conduzidas entrevistas semiestruturadas presenciais. Para orientar a condução das entrevistas foi elaborado um conjunto de 30 questões, bem como um modelo conceitual desenvolvido em estudos anteriores, conforme apresentado no Apêndice A.

A unidade de análise foi a empresa a partir da perspectiva da função manutenção, engenharia industrial e gestão de ativos. O Quadro 1 apresenta as informações das empresas e dos experts utilizados no estudo de caso.

Quadro 1: empresas utilizadas no estudo de caso

Empresa	Segmento	Entrevistado
A	Petróleo e gás	- A.1 Gerente de operações - A.2 Gerente de Gestão de Ativos
B	Transmissão de energia	- B.1 Gerente de gestão de ativos - B.2 Especialista de manutenção
C	Plásticos e borracha	- C.1 Gerente de manutenção - C.2 Gerente de engenharia industrial

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para a análise dos dados, primeiramente foram transcritas todas as gravações das respostas obtidas durante a realização das entrevistas. A partir da utilização de planilhas eletrônicas foram integradas todas as declarações e respostas dos especialistas com a respectiva pergunta. Posteriormente, foi conduzido o processo de análise que consiste na divisão dos textos em frases e parágrafos para identificar a opinião e experiência dos entrevistados, de forma a construir o entendimento e conceitos sobre o tema em estudo (Corbin e Strauss, 2014).

3.5 Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos, seguindo a orientação dos quatro elementos de análise definidos, a partir do estudo de caso proposto. Um resumo destes resultados é apresentado no Apêndice B. Destaca-se que as entrevistas realizadas não serão transcritas nem discutidas em sua totalidade, porém apresentadas de acordo com suas contribuições a cada um dos elementos de análise explorados.

3.5.1 Elemento de análise 1 (E1) - Organizações de capital intensivo definem a integração da gestão de ativos, atividades do ciclo de vida dos ativos e atividades de suporte dentro do contexto organizacional

Inicialmente foi possível identificar que as empresas A e B compartilham uma visão estratégica em termos dos impactos da gestão de ativos para o negócio. Nestas organizações a alta direção participa e principalmente fornece suporte ao processo de gestão de ativos. Por outro lado, a empresa C apresenta uma abordagem da gestão de ativos orientada por ações

táticas e, principalmente, ações operacionais. Mesmo tendo sido observada uma unanimidade entre os *experts* das empresas avaliadas em relação à importância da integração da gestão de ativos com as atividades do ciclo de vida e atividades de suporte, o mesmo não pode ser dito para as práticas adotadas pelas empresas. Enquanto na empresa C estes aspectos são abordados apenas de forma isolada no nível operacional, as demais empresas estendem esta análise ao nível estratégico. Tanto a empresa A quanto a empresa B tratam o relacionamento destes fatores como relevantes, porém somente a empresa B possui claramente definida as fases do ciclo de vida e atividades de suporte para orientar o processo de gestão de ativos.

Portanto, mesmo apresentando diferentes estágios de desenvolvimento do nível de maturidade da gestão de ativos, nenhuma das empresas consultadas possui integralmente definido como este processo se insere no contexto da organização. Neste momento, o conhecimento sobre o relacionamento destes aspectos é apenas compartilhado entre alguns gestores, não sendo um conhecimento organizacional.

3.5.2 Elemento de análise 2 (E2) - O modelo conceitual apresentado para o fluxo de informações da gestão de ativos dentro do contexto organizacional é compatível com as práticas e necessidades atuais das organizações de capital intensivo

Para avaliar a aplicabilidade do modelo conceitual inicialmente foi entendida a configuração atual do processo de gestão de ativos nessas organizações. Nas empresas A e B os níveis estratégico, tático e operacional participam do processo de gestão de ativos. Porém, para o caso da empresa A, mesmo com uma orientação estratégica a participação neste processo é predominantemente tática e operacional. Do mesmo modo, na empresa C este processo é formado pelos níveis tático e principalmente operacional. Como resultado, estas características explicam a estrutura do processo de gestão de ativos existentes nestas organizações. Enquanto na empresa C o processo se resume em ações isoladas dentro das áreas funcionais, nos níveis tático e operacional, na empresa B este processo abrange ações em todos os níveis hierárquicos. Nesta última, existe um time de pessoas, ligadas à presidência, alocadas exclusivamente para orientar e suportar o processo de gestão de ativos. A organização também utiliza a ideia de ‘líderes temáticos’, que são pessoas da estrutura funcional da organização que disseminam necessidades, práticas e orientações do processo nos níveis tático e operacional. Já na empresa A, recentemente a organização criou um departamento centralizado para orientar a gestão dos

ativos corporativos. Mesmo com esta recente abordagem holística da gestão de ativos adotada pela empresa A suas ações ainda se limitam a ações gerenciais de planejamento no nível tático e orientações para o nível operacional.

Enquanto as empresas apresentam diferenças na configuração do processo de gestão de ativos, por outro lado os *experts* convergem suas opiniões em termos da compatibilidade do modelo conceitual apresentado com as necessidades destas organizações. Orientações fornecidas pelo nível estratégico devem orientar as decisões da gestão de ativos, que é formada pelos níveis estratégico, tático e operacional, ao mesmo tempo em que coordena o relacionamento entre as atividades do ciclo de vida e atividades de suporte. Posteriormente ao entendimento da gestão de ativos dentro do contexto organizacional e avaliação da compatibilidade do modelo conceitual, o próximo passo avalia as questões relacionadas ao fluxo de informações ao longo do processo de gestão de ativos.

3.5.3 Elemento de análise 3 (E3) - Organizações de capital intensivo estabelecem e gerenciam o fluxo de informações da gestão de ativos entre os níveis estratégico, tático e operacional

Para compreender como as organizações estabelecem e gerenciam o fluxo de informações, foi aplicado um conjunto de perguntas visando identificar quais informações são coletadas ao longo dos níveis estratégico, tático e operacional. Além disso, a partir das respostas obtidas foi possível explorar questões relacionadas ao fluxo destas informações.

Em termos da estrutura para estabelecer e gerenciar o fluxo de informações, a empresa A dispõe de uma rede para o compartilhamento de dados e informações. Porém, diversos sistemas são utilizados simultaneamente pelas áreas, os quais não são integrados. Os *experts* relatam que esforços contínuos têm sido empregados para promover esta integração em toda a companhia. Em relação à empresa B, esta reconhece a relevância do fluxo e integração das informações para o processo de gestão de ativos. Diante disso, a companhia já realizou o relevamento da situação atual e ideal para a integração do sistema de informações, porém esta transformação se encontra em fase de execução. Já a empresa C gerencia as informações utilizando seu sistema ERP, porém dividindo-as conforme áreas funcionais, provocando principalmente a dificuldade de acesso aos registros. Além deste sistema, a organização C

também utiliza alguns sistemas auxiliares para apoiar o fluxo de informações, os quais não são integrados entre si.

Um fato constatado é que nenhuma das empresas consultadas traduz os resultados do desempenho dos ativos em resultados do negócio. Apenas a empresa B reconhece a necessidade de quantificar o resultado promovido pelo desempenho dos ativos para o negócio, de modo que a empresa já iniciou ações no sentido de criar esta sistemática para relacionar o desempenho dos ativos com os resultados do negócio.

Outro aspecto avaliado é a determinação de resultados de desempenho dos ativos a partir do nível estratégico para orientar as ações de planejamento. Nas três empresas consultadas a gestão do desempenho dos ativos está relacionada a indicadores globais da operação, onde a gestão de ativos é apenas um dos elementos que impactam o desempenho destes indicadores. Na empresa A cada solução de ativos implementada assume a responsabilidade de atingir resultados de desempenho previamente determinados como, por exemplo, taxa de produção diária. Para o reporte destes resultados a empresa A utiliza reuniões mensais de análise crítica. Do mesmo modo, as empresas B e C também determinam resultados de desempenho esperados ainda nas fases de implementação dos ativos. Os *experts* da empresa B relatam que os valores podem ser obtidos na forma de redução de custos, redução de riscos ou aumento de receita. Ainda na empresa B, cada promessa de resultado é incluída no orçamento da companhia e revisada periodicamente pela área financeira. Já na empresa C esta verificação da entrega dos resultados esperados não é sistematizada, ocorrendo que muitos desvios sejam tratados apenas entre as áreas operacionais.

No nível tático foram avaliadas questões relacionadas à definição dos indicadores de desempenho (KPIs) que orientam as operações. A empresa A determina KPIs para projetos e ativos em operação de forma estabelecer o resultado esperado. A partir das verificações mensais, é possível acompanhar a conformidade dos indicadores e conduzir o processo decisório como, por exemplo, continuidade, ações corretivas ou descontinuação do ativo. Assim como a empresa A, atualmente a empresa B define apenas KPIs de alto nível. Desse modo, a companhia já está desenvolvendo seu sistema de indicadores para que seja possível o desdobramento destes até o nível individual de ativos. Já a empresa C avalia o desempenho dos ativos a partir de indicadores globais operacionais, sem necessariamente estarem relacionados com indicadores estratégicos do negócio.

Em termos da coleta, processamento e armazenamento de dados da operação as empresas A e B apresentam características similares, uma vez que ambas são fiscalizadas por órgãos reguladores. Assim, todos os dados de suas operações são coletados, processados e armazenados em uma base, que pode ser consultada a qualquer instante pelo órgão regulador. No caso da empresa C, alguns dados são coletados e armazenados no sistema ERP e em sistemas paralelos, porém o acesso a estas informações fica restrito as áreas funcionais.

Ainda em nível operacional, tanto a empresa A quanto a empresa B realizam o reporte sistemático dos parâmetros de desempenho da operação, uma vez que existem métricas internas e externas a serem cumpridas. Enquanto a empresa A não relatou a existência de parâmetros específicos para o desempenho dos ativos, a empresa B destaca a utilização de indicadores de performance como, por exemplo, taxa de falha e disponibilidade, que impactam diretamente na remuneração da companhia. O reporte do desempenho operacional realizado pela empresa C se limita a um reporte mensal ao nível gerencial, porém a avaliação se limita a questões operacionais sem relacionar com o impacto no negócio.

Já no nível tático, a empresa A realiza o reporte mensal dos indicadores de desempenho do nível tático para o nível estratégico, porém a partir de indicadores gerais de desempenho, uma vez que os indicadores relacionados ao desempenho técnico dos ativos não são reportados. Por outro lado, a empresa B, por estar construindo seu sistema, ainda está definindo quais serão os indicadores dentro do sistema de gestão de ativos que serão reportados do nível tático para o estratégico. A empresa C não possui um reporte sistemático do nível tático para o estratégico, sendo esses dados e informações acessadas apenas quando demandadas.

Conforme as observações trazidas pelos *experts*, as empresas A e B apresentam um processo de tomada de decisão no nível estratégico que fornece orientações ao planejamento. Porém, cabe ressaltar que apenas a empresa B está dirigindo esforços para incorporar neste processo as características específicas da gestão de ativos. Em nível de planejamento, é observado que as três empresas realizam estas atividades de forma a estabelecer um plano operacional que orienta a execução operacional. Mais uma vez, faltam para as três empresas a inclusão de particularidades da gestão de ativos neste plano.

No nível operacional as três empresas realizam a coleta, processamento e armazenamento dos dados de desempenho da execução. Imediatamente estes dados que representam o desempenho técnico são reportados ao nível tático para, além de suportar o

processo de planejamento, permitir que informações relevantes sejam escaladas aos níveis estratégicos. A partir desta etapa do processo pode ser verificada uma descontinuidade acentuada no fluxo de informações. Os *experts* das três empresas relatam dificuldades como, por exemplo, grande volume e variedade de dados, diferentes formas de registro, falta da integração entre os diversos sistemas utilizados. Todos estes elementos podem acarretar a dificuldade de acesso e perdas de informações relevantes que deixam de contribuir com o processo de tomada de decisão no nível estratégico. Do mesmo modo, estas características relatadas impactam no nível de informações reportadas do nível tático ao nível estratégico. Conforme relatado pelos *experts* das empresas A e B, nesta interface são reportados apenas o desempenho de indicadores globais da operação, não se fazendo presentes indicadores específicos que representam o desempenho individual da base de ativos. Somente a empresa B demonstrou estar buscando incluir indicadores específicos da gestão de ativos, inclusive neste nível.

Todos estes aspectos ou deficiências observadas no *feedback* das informações do nível operacional para o nível tático, e deste para o nível estratégico, acabam limitando a qualidade das informações que suportam a tomada de decisão. Conforme relatado pelos *experts* da empresa B, a tomada de decisão em nível estratégico precisa necessariamente, além de informações estratégicas, incorporar informações técnicas e operacionais. Deste modo, é evidente a falta de mecanismos, nas três empresas, para assegurar o adequado fluxo de retorno das informações desde o nível operacional até o nível estratégico para suportar o processo de tomada de decisão. Da mesma forma que o fluxo de informações, os princípios utilizados para a tomada de decisão também assumem um papel determinante no processo de gestão de ativos (Roda e Macchi, 2016). Assim, a partir do elemento de análise E4, é avaliado o nível de adoção destes princípios no processo de tomada de decisão, nas empresas em estudo.

3.5.4 Elemento de análise 4 (E4) - A tomada de decisão da gestão de ativos em organizações de capital intensivo é orientada pelos quatro princípios (orientação a riscos, ciclo de vida, sistemas e ativos), e pelos aspectos de ciclo de vida e níveis hierárquicos de controle dos ativos

Com o objetivo de compreender o processo de tomada de decisão, foram aplicadas algumas perguntas explorando os fatores que orientam a tomada de decisão ao longo do

processo de gestão de ativos. Estes fatores envolvem os princípios da tomada de decisão que incluem a orientação ao ciclo de vida, orientação ao sistema de ativos, orientação a riscos e orientação centrada nos ativos. Além destes princípios, a tomada de decisão envolve os aspectos das fases do ciclo de vida e níveis hierárquicos da decisão.

A orientação ao ciclo de vida contempla a adoção de uma abordagem integrada das ações em cada estágio do ciclo de vida do ativo, bem como a adoção de indicadores e objetivos de desempenho de longo prazo no gerenciamento dos ativos (Kans e Galar, 2016; Roda e Macchi 2016). A partir das observações dos *experts* das empresas A, B e C, existe uma tendência e esforços das organizações no sentido de promover a integração de funções operacionais, principalmente àquelas de manutenção. Por outro lado, foi observado que existem lacunas no nível organizacional que impedem a completa integração da gestão de ativos nestas empresas.

Na fase inicial do ciclo de vida, que envolve o *design*, construção e comissionamento, os *experts* relatam ser esperada a cooperação entre funções, como projeto, compras e manutenção. Principalmente na empresa B, foram relatados esforços da organização no sentido de promover a integração destas funções. Já uma observação destacada pelos *experts* destas empresas refere-se à necessidade de a função manutenção assumir um papel mais ativo na fase inicial do ciclo de vida dos ativos. Na fase da metade da vida do ativo, os *experts* compartilham a visão de que a manutenção assume um papel fundamental, devendo estar integrada com outras funções, como por exemplo, a função produção. Do mesmo modo, os *experts* das empresas B e C relatam que a manutenção deveria participar mais ativamente do processo de tomada de decisão ao invés de se limitar a ações de confiabilidade e disponibilidade dos ativos. Já na fase final do ciclo de vida, que envolve a disposição dos ativos, os *experts* relatam um baixo nível de integração. Adicionalmente, os *experts* destacam que nesta fase a manutenção também assume uma função apenas de execução, não tendo participação no processo decisório.

A inserção de objetivos de longo prazo na gestão de ativos surge a partir de indicadores e ferramentas utilizadas pelas empresas para suportar o processo de tomada de decisão. Conforme relatado pelos *experts*, alguns métodos tradicionalmente utilizados para avaliar os investimentos em ativos são Valor Presente Líquido (VPL), *PayBack*, *Return on investment* (ROI) e Taxa Interna de Retorno (TIR). Embora a adoção destes indicadores implique a adoção de uma visão de longo prazo, os *experts* relatam que na maioria dos casos as organizações

determinam um Capex (*Capital Expenditures*) e estimam um Opex (*Operational Expenditures*). Estes observam que muitas vezes estas estimativas apresentam incertezas, podendo trazer distorções em relação aos resultados alcançados com os investimentos. Além disso, os *experts* relatam o desafio das organizações no sentido de estabelecer o *trade-off* entre Capex e Opex, assim como mencionado por Kans e Galar (2016), de forma a atingir uma política adequada de investimentos de capital, assegurando de forma otimizada a capacidade da base de ativos. Deste modo, os *experts* das empresas A e B relatam a necessidade do emprego de ferramentas que incorporem a dimensão técnica, de forma a estimar adequadamente o desempenho dos ativos, e assim viabilizar uma análise financeira precisa.

Outro princípio é a orientação ao sistema que promove a adoção de uma visão holística do sistema de ativos, e não somente a abordagem individual no nível de ativo. Segundo Roda e Macchi (2016), ativos industriais são sistemas formados por conjunto de ativos, que interagem entre si para desempenhar as funções desejadas, que possuem características próprias de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade. Neste sentido, os *experts* das três empresas consultadas demonstraram consciência em termos da importância da adoção de uma visão sistêmica, levando em conta os impactos de decisões locais no desempenho global do sistema de ativos. Conforme relatado pelos *experts* da empresa B, existe uma preocupação muito grande na companhia em termos da confiabilidade dos sistemas de ativos. Assim, eles destacam esforços para a adoção de ferramentas avançadas de engenharia para suportar o processo de análise de confiabilidade e disponibilidade dos sistemas de ativos. Mesmo as organizações reconhecendo a importância da adoção de uma abordagem sistêmica, estas práticas ainda não estão implementadas de forma sistemática nas organizações consultadas.

A orientação a riscos frequentemente promove que a tomada de decisão relacionada aos ativos busque atingir conformidade com requisitos regulatórios como, por exemplo, de segurança e ambiental. Por outro lado, existem riscos operacionais que podem trazer certo nível de incerteza em relação aos resultados esperados de desempenho dos ativos (Roda e Macchi, 2016). Conforme relatado pelos *experts*, a confiabilidade e o nível de desempenho dos ativos são críticos para as empresas em análise. Diferentemente da empresa C, as empresas A e B possuem um processo formal para avaliar riscos e oportunidades dos ativos da companhia. Tanto na empresa A quanto na empresa B o processo de tomada de decisão e planejamento é orientado pela gestão de riscos, que inclui a avaliação dos riscos operacionais relacionados aos

ativos. Já na empresa C são relatadas algumas ações isoladas de avaliação de riscos operacionais orientadas a alguns ativos específicos. Mesmo com estas iniciativas de abordagem dos riscos, os *experts* das empresas A e B relatam a ausência de esforços para quantificar, em termos monetários, as incertezas provocadas pelos riscos operacionais. Deste modo, os próprios *experts* observam a necessidade de análises de dados e técnicas de engenharia para fornecer medidas adequadas de desempenho técnico, que juntamente com indicadores financeiros possam suportar o processo de tomada de decisão.

A orientação centrada em ativos se concentra nos dados e informações específicas dos ativos, para suportar a tomada de decisão. Essa orientação assume relevância para empresas de capital intensivo, onde os ativos e o desempenho destes é fundamental para as operações e para alcance dos objetivos do negócio. Os *experts* relatam que informações técnicas dos ativos armazenadas no sistema de gerenciamento de manutenção são parcialmente integradas com os sistemas de informações corporativos. Os *experts*, assim como destacado por Roda e Macchi (2016) e Marquez *et al.* (2020), observam a necessidade do desenvolvimento de sistemas integrados que permitam a coleta e análise de uma grande quantidade de dados, econômicos e técnicos, sobre o desempenho dos ativos que forneçam suporte ao processo de tomada de decisão.

A orientação centrada nos dados e informações específicas dos ativos é declarada como relevante. Inclusive existe a disponibilidade de dados, porém a dificuldade de acesso a estes dados leva muitas vezes a tomada de decisão não contemplar todos os aspectos importantes desta abordagem.

3.6 Discussão dos resultados

Nesta seção são apresentadas algumas discussões acerca dos resultados, bem como uma discussão sobre oportunidades trazidas pela Indústria 4.0 dirigida a partir de observações e desdobramentos desta pesquisa.

3.6.1 Discussão dos elementos de análise

Em termos de E1, foi observado que o conhecimento sobre a integração da gestão de ativos no contexto organizacional se limita a poucos gestores. Mesmo a organização B

apresentando significativos esforços neste sentido, a formalização deste conhecimento no nível organizacional ainda precisa ser desenvolvida. Deste modo, E1 não pôde ser aceita. Mesmo assim, a partir de E1 é possível verificar que a integração já é explorada por empresas que se encontram em estágios mais avançados na adoção de práticas de gestão de ativos. Os relatos dos *experts* também indicam que com o passar do tempo as demais organizações tendem a explorar esta questão, à medida que desenvolvam seus processos de gestão de ativos.

Com E2 foi possível avaliar a compatibilidade do modelo conceitual com as necessidades das organizações em estudo. A partir dos relatos apresentados pelos *experts* das três empresas o elemento de análise E2 pôde ser aceito. Conforme os *experts*, o processo de gestão de ativos deve estabelecer a troca de informações com o nível estratégico. Além disso, o processo de gestão de ativos precisa estabelecer o fluxo de informações com as atividades do ciclo de vida e atividades de suporte.

A partir de E3 foi possível avaliar como as organizações estabelecem e gerenciam o fluxo de informações da gestão de ativos entre os níveis estratégico, tático e operacional. Conforme observado, as empresas A e B dirigem significativos esforços no sentido de estabelecer e gerenciar o fluxo de informações, porém ainda assim existem *gaps* a serem explorados por ambas as organizações. As principais dificuldades surgem a partir do *feedback* de informações do nível operacional para os níveis tático e em seguida para o nível estratégico. Estas discontinuidades no fluxo de informações acabam comprometendo o processo de tomada de decisão no nível estratégico. Deste modo, E3 não pôde ser aceita, uma vez que nas três empresas avaliadas ainda existem desafios a serem alcançados para estabelecer um fluxo de informações similar ao modelo proposto.

Com E4 foi possível avaliar a orientação da tomada de decisão empregada no processo de gestão de ativos. Primeiramente foi evidenciado que as empresas avaliadas não classificam os diferentes tipos de decisões da gestão de ativos em termos dos níveis de controle e a fase do ciclo de vida dos ativos. Por outro lado, os *experts* das três empresas avaliadas relatam ser oportuna a utilização destas duas dimensões para classificar as decisões da gestão de ativos. Já em relação à adoção dos princípios para integração da gestão de ativos são identificados diversos *gaps* nas empresas avaliadas. A orientação a ativos se faz presente nas três empresas avaliadas, porém em virtude de falhas no fluxo de informações do nível operacional até o nível estratégico, muitas vezes estas informações não são consideradas na tomada de decisão. A

orientação a riscos existe, porém, aspectos e características específicas dos ativos devem ser acrescentados ao processo de avaliação dos riscos. O emprego da abordagem orientada ao ciclo de vida apresenta significativo interesse e aplicação por parte das empresas. Já a abordagem orientada a sistema apresenta baixa adoção por parte das empresas avaliadas. Em virtude destes aspectos, E4 é rejeitada, porém permite identificar pontos a serem explorados pelas organizações no sentido de estruturar adequadamente a tomada de decisão da gestão de ativos.

3.6.2 Contribuições da Indústria 4.0 para a Gestão de Ativos

De modo geral, os *experts* relatam algumas dificuldades para a operacionalização do processo de gestão de ativos, como a falta de integração entre os sistemas de informações, a distância temporária entre atividades do ciclo de vida dos ativos, a dificuldade de acesso às informações, e a organização e interpretação dos dados para gerar informações para suportar a tomada de decisão. Outro aspecto relatado pelos *experts* é o desafio para unificar processos que gerenciam funções abrangentes em vários sites de uma organização (IBM, 2016). Para Roda e Macchi (2016), Macchi *et al.* (2018), e Marquez *et al.* (2020) a integração de informações é um elemento que habilita a efetiva implementação do processo de gestão de ativos.

Neste sentido, Spüntrup e Imsland (2018), Kans e Galar (2016), Maletič *et al.* (2020), e Marquez *et al.* (2020) observam que os recentes desenvolvimentos tecnológicos trazidos pela Indústria 4.0 fornecem novos potenciais para a implementação da gestão de ativos. Tecnologias ajudam a resolver os problemas relacionados à questão temporal das atividades que ocorrem ao longo do ciclo de vida. Estas também auxiliam na integração de todas as áreas e favorecem a disponibilidade e o acesso imediato de informações para suportar o processo de tomada de decisão (Emmanouilidis e Komonen, 2013; Brous *et al.*, 2018; Macchi *et al.*, 2018; Spüntrup e Imsland, 2018).

Muitas são as oportunidades e desafios para a indústria trazidos pelas tecnologias da Indústria 4.0 (Büchi *et al.*, 2020). Um monitoramento de ativos mais avançado está disponível à medida que mais tecnologias são implementadas nas operações (Spüntrup e Imsland, 2018; Marquez *et al.*, 2020). Segundo Roda e Macchi (2016), uma das causas para os *gaps* na integração dos processos de gestão de ativos pode ser atribuída ao baixo nível de desenvolvimento tecnológico das empresas. Assim, a definição de quais tecnologias aplicar,

como implementar tecnologias, e como avaliar os benefícios alcançados com a aplicação destas tecnologias são questões que atualmente as organizações precisam responder (Marquez *et al.*, 2020). Para Macchi *et al.* (2018), muitas oportunidades e desafios surgem para a gestão de ativos decorrentes das tecnologias digitais, que ainda precisam ser exploradas pelas organizações. A aplicação de tecnologias avançadas de análise e otimização permite a gestão de ativos transformar uma grande quantidade de dados, provenientes de medições e de sensores, em informações fundamentais para a tomada de decisão (Hampapur *et al.*, 2011; Dalmarco *et al.*, 2019).

Para lidar com os desafios relacionados à complexidade e à distribuição física do portfólio de ativos, muitas organizações estão aplicando a tecnologia *Internet of Things* (IoT) como uma ferramenta de gestão de ativos, uma vez que esta tecnologia permite uma nova forma para capturar dados e monitorar os ativos (Hua *et al.*, 2014; Brous *et al.*, 2018). No estudo apresentado por Brous *et al.* (2018), os autores investigam o efeito da adoção de IoT no processo de tomada de decisão da gestão de ativos. Juntamente com outras tecnologias, o conceito de IoT representa um cenário em que os ativos físicos passam a ser dotados de sensores, permitindo a estes comunicar automaticamente seu estado com outros ativos, bem como compartilhar dados sobre seu desempenho em tempo real (Brous *et al.*, 2018; Manavalan e Jayakrishna, 2019). Em seguida estes dados são enviados para um serviço de *Cloud Computing* (Büchi *et al.*, 2020). Uma vez capturados e armazenados os dados, o emprego de ferramentas de análise como *Data Analytics*, fornecem capacidade preditiva em relação ao funcionamento dos ativos, como alerta de falhas e demais informações que suportam o processo de tomada de decisão visando otimizar o desempenho dos ativos (Macchi *et al.*, 2018; Büchi *et al.*, 2020; Marquez *et al.*, 2020). Além de tecnologias operacionais como Manufatura Aditiva e Robôs colaborativos, esta nova era aponta grandes oportunidades a partir da adoção de tecnologias móveis, de nuvem e de análise para coletar, consolidar e analisar dados visando ajustar o desempenho dos ativos (IBM, 2016).

Diante do contexto apresentado, fica evidente que as tecnologias da Indústria 4.0 oferecem soluções inovadoras para os desafios enfrentados na gestão de ativos físicos em empresas de capital intensivo (Candón *et al.*, 2019; Maletič *et al.*, 2020). A integração de sistemas, a coleta e análise de dados em tempo real, impulsionadas por tecnologias como *Internet of Things* (IoT), *Cloud Computing*, *Data Analytics*, Manufatura Aditiva, e Robôs

colaborativos, proporciona uma gestão mais eficiente e preditiva dos ativos ao longo de seus ciclos de vida (Candón *et al.*, 2019; Kans e Galar, 2016).

No entanto, surge um novo desafio crucial relacionado à avaliação estratégica dos investimentos em tecnologias da Indústria 4.0 (Almeida *et al.*, 2022). As organizações precisam tomar decisões informadas sobre quais tecnologias adotar, considerando seu nível de desenvolvimento tecnológico, os benefícios esperados e os custos associados (Maletič *et al.*, 2020; Marquez *et al.*, 2020). A complexidade dessa escolha reside na diversidade de opções disponíveis e na necessidade de alinhar essas tecnologias aos objetivos operacionais e estratégicos da empresa (Marquez *et al.*, 2020).

Para superar esse desafio, as organizações devem realizar uma análise criteriosa, considerando fatores como o retorno sobre o investimento, alinhamento com metas estratégicas, impacto na eficiência operacional e capacidade de integração com os sistemas existentes (Candón *et al.*, 2019; Maletič *et al.*, 2020; Marquez *et al.*, 2020; Almeida *et al.*, 2022). Além disso, é fundamental envolver todas as partes interessadas, garantindo uma abordagem colaborativa que leve em conta as necessidades específicas dos processos e a realidade operacional da empresa (Almeida *et al.*, 2022).

Em resumo, enquanto as tecnologias da Indústria 4.0 oferecem um caminho promissor para aprimorar a gestão de ativos físicos, a tomada de decisão sobre investimentos nessas tecnologias requer uma abordagem cuidadosa e estratégica (Marquez *et al.*, 2020; Almeida *et al.*, 2022). A capacidade de avaliar e selecionar as tecnologias mais adequadas será crucial para o sucesso das empresas de capital intensivo na era da transformação digital (Almeida *et al.*, 2022).

3.7 Conclusões e recomendações para pesquisas futuras

Fatores como o surgimento de padrões normativos e pressões competitivas por melhores níveis de desempenho faz com que a gestão de ativos assuma uma posição de cada vez mais destaque em empresas de capital intensivo. Além de promover a geração de valor a partir do desempenho dos ativos, o processo de gestão de ativos determina um conjunto de atividades e procedimentos sistematizados e coordenados com os quais uma organização realiza a gestão otimizada de seus ativos físicos, promovendo a melhor relação entre custo, risco e

desempenho (Mitchell, 2006; Hastings, 2010; ISO 55000: 2014; Petchrompo e Parlikad, 2019; Maletič *et al.*, 2020). Para alcançar este objetivo a tomada de decisão assume um papel determinante ao longo do processo de gestão de ativos.

Neste sentido, foram desenvolvidos quatro elementos de análise, baseadas na literatura e na opinião de especialistas, que possibilitou explorar aspectos relevantes da estrutura de gestão de ativos dentro do contexto organizacional. O elemento de análise E1 permitiu avaliar como está estruturada a gestão de ativos dentro do contexto organizacional. Já E2 e E3 avaliaram os aspectos relacionados ao fluxo de informações dentro do processo de gestão de ativos. Por fim, o elemento de análise E4 avaliou a orientação da tomada de decisões adotada ao longo do processo de gestão de ativos. Com o estudo de caso foi possível investigar o nível de desenvolvimento das práticas empregadas por estas empresas para a gestão dos seus ativos físicos. Apesar de o estudo revelar muitos esforços praticados pelas empresas, apenas E2 foi aceita. A rejeição dos demais elementos de análise demonstra que a gestão de ativos e principalmente o processo de tomada de decisão ainda carecem de iniciativas de aprimoramento dentro do contexto prático das organizações.

Conforme observações trazidas nesse estudo, ainda falta uma compreensão clara e formal, por parte das organizações, do relacionamento do processo de gestão de ativos com o contexto organizacional (Maletič *et al.*, 2020). Outro aspecto observado está relacionado com as dificuldades no fluxo de dados e informações entre os níveis estratégico, tático e operacional (Marquez *et al.*, 2020). Além disso, o processo de tomada de decisão aborda de maneira parcial os princípios da tomada de decisão trazidos pela literatura sobre gestão de ativos.

A partir das dificuldades observadas passa a ser determinante para as organizações a mobilização no sentido de adoção de novas tecnologias. Os desenvolvimentos tecnológicos trazidos pela Indústria 4.0 fornecem novos potenciais para a implementação e otimização do processo de gestão de ativos. Estas tecnologias simplificam a integração entre as áreas e atividades ao longo do ciclo de vida dos ativos, além de promover a disponibilidade e acesso imediato a dados e informações para suportar o processo de tomada de decisão (Emmanouilidis e Komonen, 2013; Brous *et al.*, 2018; Macchi *et al.*, 2018; Spüntrup e Imsland, 2018; Maletič *et al.*, 2020; Marquez *et al.*, 2020).

Com estas observações fica evidente a contribuição que tecnologias da Indústria 4.0 podem fornecer para a gestão de ativos e principalmente para estruturar a tomada de decisão

sobre os ativos. Assim, estas tecnologias, além de constituírem uma solução para o aprimoramento do processo de gestão de ativos, representam um desafio para as organizações a inserção destes ativos de tecnologia. Deste modo, decisões de investimentos neste contexto passam a serem questões presentes e relevantes para a gestão de ativos, pois, segundo os *experts*, cerca de 80% dos custos do ciclo de vida dos ativos são definidos durante a fase do projeto. Assim, além dos desafios tradicionais da gestão de ativos relatados no artigo, cada vez mais os tomadores de decisão precisam lidar com as demandas diversas de investimentos concorrentes frente a recursos financeiros limitados, enquanto, também, distribuir recursos limitados para assegurar que a base de ativos existente seja mantida em condições adequadas de operação (Kabir *et al.*, 2014; Kans e Galar, 2016; Brous *et al.*, 2018).

A partir destas observações fica evidente a necessidade e importância da estruturação do processo de tomada de decisão, principalmente nos níveis estratégico e tático da gestão de ativos. Este desenho do processo de tomada de decisão precisa, além de abordar questões relacionadas ao portfólio de ativos existente, incluir elementos para suportar a decisão de novos investimentos e inclusive investimentos em novas tecnologias. Assim, uma oportunidade de pesquisa futura é a investigação e estruturação do processo de tomada de decisão de investimentos no contexto da gestão de ativos.

Outra oportunidade de estudos futuros é a aplicação deste estudo em um número maior de empresas, buscando identificar particularidades de diferentes segmentos da indústria, uma vez que este estudo abordou apenas três empresas no estudo de caso. A investigação de características de empresas prestadoras de serviços frente a empresas fabricantes de bens pode constituir uma linha interessante a ser explorada neste contexto da gestão de ativos. Por fim, inúmeras são as oportunidades de abordagens acerca da temática gestão de ativos, que vem se tornando um tema cada vez mais relevante principalmente para empresas de capital intensivo. Estas oportunidades se intensificam, assim como surgem novos desafios, a partir do atual ambiente de desenvolvimento tecnológico que as organizações estão inseridas.

3.8 Referências

Aghabegloo, M.; Rezaie, K.; Ali Torabi, S.; Yazdani, M. "Integrating business impact analysis and risk assessment for physical asset criticality analysis: A framework for sustainable operations in process industries", *Expert Systems with Applications*, 241, (2024).

- Alhazmi, N. A theoretical framework for physical asset management practices. *Facilities*, Vol. 36 Issue: 3/4, pp.135-150, (2018).
- Almeida, R. P.; Ayala, N. F.; Benitez, G. B.; Kliemann Neto; F. J.; Frank, A. G. How to assess investments in industry 4.0 technologies? A multiple-criteria framework for economic, financial, and sociotechnical factors, *Production Planning & Control*, (2022).
- Alsyouf, I.; Alsuwaidi, M.; Hamdan, S.; Shamsuzzaman, M. "Impact of ISO 55000 on organisational performance: Evidence from certified UAE firms", *TOTAL QUALITY MANAGEMENT & BUSINESS EXCELLENCE*, 32(1–2), 1–19, (2018).
- Amadi-Echendu, J. E.; Willett, R.; Brown, K.; Lee, J.; Mathew, J.; Vyas, N.; Yang, B. What is Engineering Asset Management? In *Proceedings 2nd World Congress on Engineering Asset Management and the 4th International Conference on Condition Monitoring*, pages pp. 116-129, Harrogate, United Kingdom, (2007).
- Backman, J.; Helaakoski, H. Evaluation of Internet-of-Things Platforms for Asset Management. Springer International Publishing Switzerland 2016 K.T. Koskinen et al. (eds.), *Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2015)*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, (2016).
- Borek, A.; Parlikad, A. K., Woodall, P.; Tomasella, M. "A Risk Based Model for Quantifying the Impact of Information Quality." *Computers in Industry* 65 (2): 354–66, (2014).
- Brous, P.; Janssen, M.; Herder, P. Internet of Things adoption for reconfiguring decision-making processes in asset management. *Business Process Management Journal*, (2018): <https://doi.org/10.1108/BPMJ-11-2017-0328>
- Brown, R. E.; Humphrey, B. G. *Asset Management for Transmission and Distribution*. IEEE power & energy magazine, (2005).
- Büchi, G.; Cugno, M.; Castagnoli, R. Smart factory performance and Industry 4.0. *Technological Forecasting & Social Change*, 150, 119790, (2020).
- Campos, J.; Sharma, P.; Gabiria, U. G.; Jantunen, E.; Baglee, D. A big data analytical architecture for the Asset Management. *The 9th CIRP IPSS Conference: Circular Perspectives on Product/Service-Systems*. *Procedia CIRP* 64, p. 369 – 374, (2017).
- Candón, E.; Martínez-Galán, P.; De la Fuente, A.; González-Prida, V.; Crespo Márquez, A.; Gómez, J.; Sola, A.; Macchi, M. "Implementing Intelligent Asset Management Systems (IAMS) within an Industry 4.0 Manufacturing Environment", *IFAC PapersOnLine*, 52(13), 2488–2493, (2019).
- Catelli, A.; Parisi, C.; Santos, E. S. Gestão econômica de investimentos em ativos fixos. *Revista Contabilidade & Finanças - USP*, São Paulo, n. 31, p. 26 - 44, janeiro/abril, (2003).
- Corbin, J.; Strauss, A. *Basics of qualitative research: Techniques and procedures for developing grounded theory*, Sage publications, (2014).

- Dalenogare, L. S.; Benitez, G. B.; Ayala, N. F.; Frank, A. G. The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics* 204, 383-394, (2018).
- Dalmarco, G.; Ramalho, F. R.; Barros, A. C.; Soares, A. L. Providing industry 4.0 technologies: The case of a production technology cluster. *Journal of High Technology Management Research*, 100355, (2019).
- El-Akruti, K. O.; Dwight, R. Research methodologies for engineering asset management. *ACSPRI Social Science Methodology Conference*, (2010).
- El-Akruti, K. O. The strategic role of engineering asset management in capital intensive organizations. Doctor of Philosophy thesis. School of Mechanical, Materials and Mechatronic Engineering, University of Wollongong. Australia, (2012).
- El-Akruti, K.; Dwight, R. A framework for the engineering asset management system. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 19 Issue: 4, pp. 398-412, (2013).
- El-Akruti, K.; Dwight, R.; Zhang, T. The strategic role of engineering asset management. *International Journal of Production Economics*, 146 (1), pp. 227-239, (2013).
- Emmanouilidis, C.; Komonen, K. Physical Asset Management Practices in Industry: Comparisons between Greece and Other EU Countries. *Advances in Production Management Systems, Apms, Pt Ii*, 415, pp. 509–516, (2013).
- Frolov, V.; Megel, D.; Bandara, W.; Sun, Y.; Ma, L. Building an ontology and process architecture for engineering asset management. *Proceedings of the 4th World Congress on Engineering Asset Management*. Athens, Greece, 28-30 September, (2009).
- Greco, M.; Cricelli, L.; Grimaldi, M. A strategic management framework of tangible and intangible assets. *European Management Journal*, v. 31, pp. 55-66, (2013).
- Hampapur, A.; Cao, H.; Davenport, A.; Dong, W. S.; Fenhagen, D.; Feris, R. S.; Goldszmidt, G.; Jiang, Z. B.; Kalagnanam, J.; Kumar, T.; Li, H.; Liu, X.; Mahatma, S.; Pankanti, S.; Pelleg, D.; Sun, W.; Taylor, M.; Tian, C. H.; Wasserkrug, S.; Xie, L.; Lodhi, M.; Kiely, C.; Butturff, K.; Desjardins, L. Analytics-driven asset management. *IBM J. Res. & Dev.* vol. 55 no. 1&2 PAPER 13 January/march (2011).
- Hastings, N. A. J. *Physical Asset Management*. Springer London Dordrecht Heidelberg New York, (2010).
- Heitz, C.; Goren, L.; Sigrist, J. Decision Making in Asset Management: Optimal Allocation of Resources for Maximizing Value Realization. *Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2015)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 259-268, (2016).
- Hipkin, I. Knowledge and IS implementation: case studies in physical asset management. *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 21 Iss 10 pp. 1358 – 1380, (2001).

Hua, L., Junguo, Z.; Fantao, L. Internet of things technology and its applications in smart grid. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, Vol. 12 No. 2, pp. 940-946, (2014).

IBM, (2016). Understanding the impact and value of enterprise asset management. IBM Watson IoT for Asset Management helps you make smarter decisions about your assets by combining the world-class power of IBM Maximo software with IoT data and cognitive computing. © Copyright IBM Corporation 2016 IBM Global Business Services, Produced in the United States of America, August (2016).

ISO 55000. Asset Management: Overview, principles and terminology. International Organization for Standardization. Geneva, (2014).

Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 WG, (2013).

Kans, M.; Galar, D. "The Impact of Maintenance 4.0 and Big Data Analytics within Strategic Asset Management Mirka", MPMM 2016: Maintenance Performance Measurement & Management. In 6th International Conference on Maintenance, (2016).

Macchi, M.; Roda, I.; Negri, E.; Fumagalli, L. Exploring the role of Digital Twin for Asset Lifecycle Management. IFAC PapersOnLine 51-11, 790-795, (2018).

Maletič, D.; Maletič, M.; Al-Najjar, B.; Gomišček, B. "An Analysis of Physical Asset Management Core Practices and Their Influence on Operational Performance", SUSTAINABILITY, 12 (21), 9097, (2020).

Maletič, D.; Maletič, M.; Al-Najjar, B.; Gotzamani, K.; Gianni, M.; Kalinowski B. T.; Gomišček, B. Contingency Factors Influencing Implementation of Physical Asset Management Practices. Organizacija, Volume 50 Number 1, February (2017).

Manavalan, E.; Jayakrishna, K. A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. Computers & Industrial Engineering, 127, 925-953, (2019).

Marquez, A. C.; Fernandez, J. F. G.; Fernández, P. M.-G.; Lopez, A. G. "Maintenance Management through Intelligent Asset Management Platforms (IAMP) Emerging Factors, Key Impact Areas and Data Models", Energies, 13 (July), 3762, (2020).

Mitchell, J. S. Asset Management Handbook. Fourth Edition, August 2006. (446 páginas, Clarion Technical Pub; Edição: 4, December (2006).

Msongole, S. S.; Bakuwa, R. C.; Mkandawire, B. O. B. "Assessing the level of application of physical asset management core practices at water boards in Malawi", Heliyon, 8(11), e11614, (2022).

Ouertani, M. Z.; Parlikad, A. K.; Mcfarlane, D. Asset information management: Research challenges. *2008 Second International Conference on Research Challenges in Information Science*. Marrakech, Marocco, Inst. of Elec. and Elec. Eng. (IEEE), pp. 361-370, (2008).

Petchrompo, S.; Parlikad, A. K. A review of asset management literature on multi-asset systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 181, 181-201, (2019).

Porter, M. E. *The Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*. New York: Free Press, 1985. Republished with a new introduction, (1998).

Porter, M., Heppelmann, J. How smart, connected products are transforming competition. *Harv. Bus. Rev.* 92, 64–88, (2014).

Qiu, X.; Luo, H.; Xu, G.; Zhong, R.; Huang, G. Q. Physical assets and service sharing for IoT-enabled Supply Hub in Industrial Park (SHIP). *Int. J. Production Economics*, v. 159, pp. 4-15, (2015).

Roda, I.; Garetti, M. TCO Evaluation in Physical Asset Management: Benefits and Limitations for Industrial Adoption. Conference: IFIP WG 5.7 International Conference on Advances in Production Management Systems, v. 440, pp. 216-223, (2014).

Roda, I.; Macchi, M. Studying the funding principles for integrating Asset Management in Operations: an empirical research in production companies. *IFAC-PapersOnLine*, v. 49-28, pp. 01-06, (2016).

Ruitenburt, R. J.; Braaksma, A. J. J. Evaluation of the Lifetime Impact Identification Analysis: Two tests in a changeable context. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 17, pp. 42-49, (2017).

Schuman, C. A.; Brent, A. C. Asset life cycle management: towards improving physical asset performance in the process industry. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 25 Iss 6, pp. 566-579, (2005).

Spüntrup, F.; Imsland, L. Asset fleet management in the process industry – a conceptual model. *IFAC PapersOnLine* 51-18, 281-286, (2018).

Taylor, W. B. *The Use of Life Cycle Costing in Acquiring Physical Assets*. Long Range Planning, Vol. 14, No. 6, pp. 32-43, (1981).

3.9 Apêndices

3.9.1 Apêndice A

Roteiro de questões para condução das entrevistas – Gestão de Ativos Físicos em empresas de capital intensivo

Esta pesquisa faz parte da metodologia de desenvolvimento de uma Tese de Doutorado e tem como objetivo identificar as práticas de Gestão de Ativos Físicos em organizações de

capital intensivo, que possuam um sistema de gestão de ativos. Neste estudo, ‘ativo’ é algo que possui valor real, ou potencial, para uma organização (ISO 55000). Já a gestão de ativos é definida como a atividade coordenada de uma organização para gerar valor a partir de seus ativos (IAM). Do mesmo modo, o Sistema de Gestão de Ativos é um conjunto de elementos inter-relacionados e interativos de uma organização que estabelece políticas e objetivos, bem como o processo necessário para o alcance destes objetivos.

Empresa:

Participantes:

Data de realização:

1) Objetivo da pesquisa:

Dada a crescente necessidade das organizações em aperfeiçoar a gestão de seus ativos físicos aliado ao avanço recente da literatura e dos padrões internacionais para gestão de ativos, este trabalho apresenta como tema central ‘gestão de ativos físicos em organizações de capital intensivo’.

A partir da temática proposta, este estudo tem como objetivo avaliar o nível de observância à literatura e aos padrões normativos, quanto aos elementos que constituem os sistemas de gestão de ativos, operacionalizados em empresas de capital intensivo.

Como orientação, as perguntas devem ser respondidas considerando o contexto ilustrado pela estrutura de gestão de ativos apresentada nas figuras A e B.

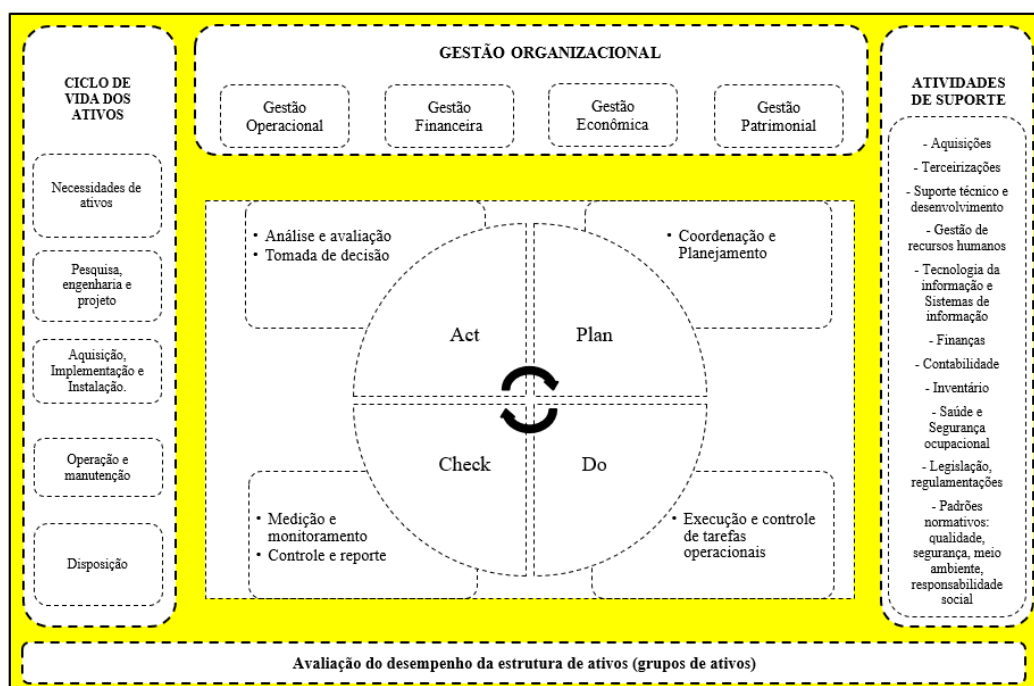
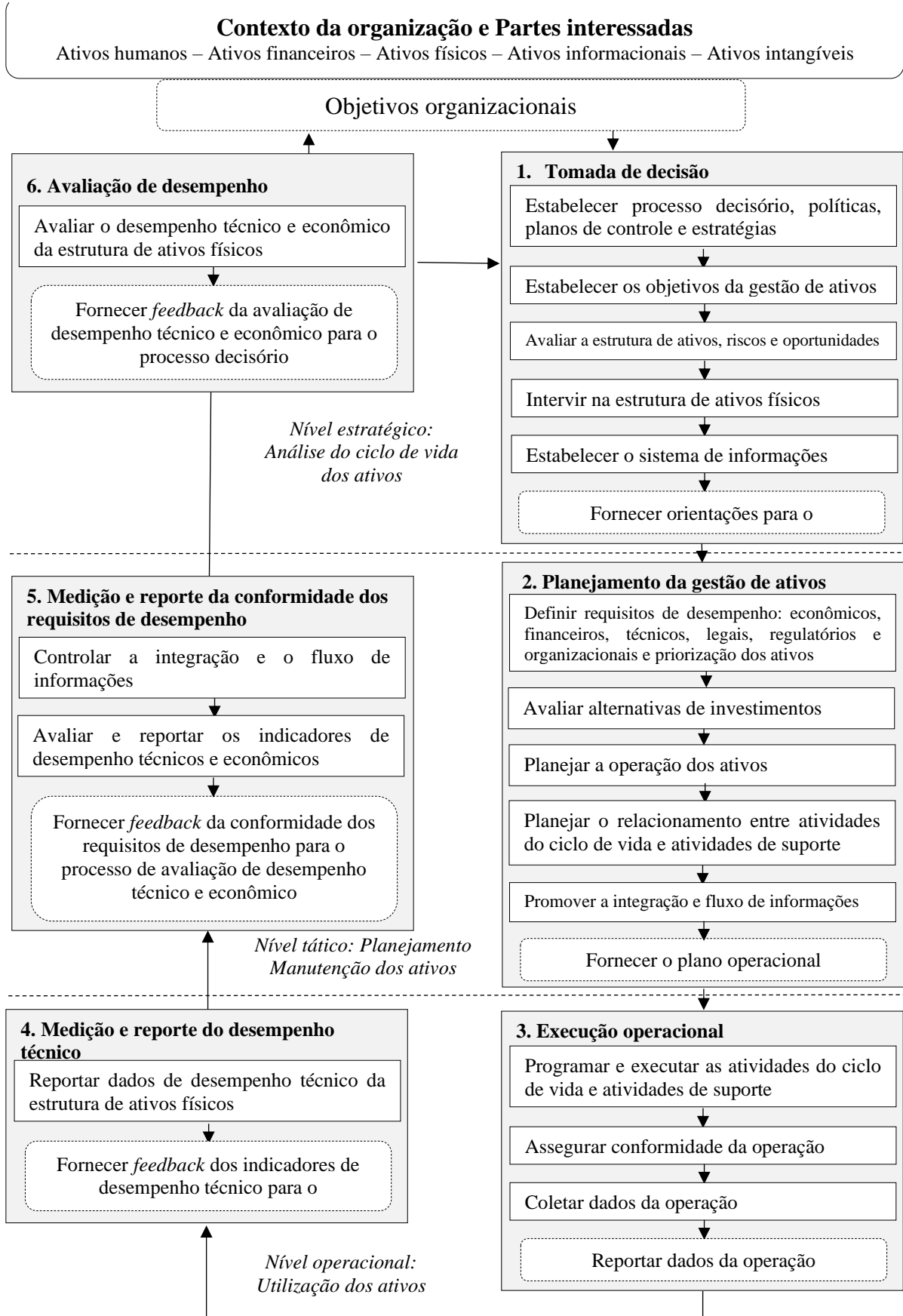


Figura A: Modelo conceitual para Gestão de Ativos Físicos em empresas de capital intensivo

Figura B: Modelo conceitual para o processo de gestão de ativos físicos



2) Perguntas iniciais para quebrar o gelo:

- Em sua opinião, como a ‘gestão de ativos’ é vista atualmente por empresas de capital intensivo?
- A empresa possui uma estrutura para Gestão de Ativos Corporativos?
 - Existe estrutura apenas orientativa ____
 - Existe estrutura implementada de forma sistemática ____
 - Existe estrutura informal ____
- Quais níveis hierárquicos (estratégico, tático e operacional) e áreas participam do processo de gestão de ativos?

3) Perguntas centrais:

Processo decisório (Estratégico) – Fornece Direções de controle para o planejamento

1. Existe alguma sistemática, procedimento, processo no qual a organização avalia quais eventos ou mudanças estratégicas exigem uma solução de ativos?
 - a. Existe processo apenas orientativo __
 - b. Existe processo implementado de forma sistemática __
 - c. Processo informal __
2. Como são estabelecidas as alternativas de possíveis soluções de ativos?
 - a. Existe processo apenas orientativo __
 - b. Existe processo implementado de forma sistemática __
 - c. Alternativas são criadas de forma aleatória, conforme o tipo de estratégia __
3. Como ocorre a seleção de determinada solução de ativos?
 - a. Existe um processo que determina as ferramentas, porém apenas orientativo __
 - b. Existe processo implementado de forma sistemática para seleção de alternativas __
 - c. Processo informal, que seleciona alternativas conforme o tipo de estratégia__
4. São definidos os resultados de desempenho requeridos da solução de ativos para alcançar a estratégia da companhia?
 - a. Alguns resultados são definidos, porém não são relacionados com a estratégia _
 - b. Os resultados são definidos e devidamente relacionados com a estratégia __
 - c. Resultados de desempenho são definidos conforme o ativo __
 - d. Processo é informal __
5. Os resultados de desempenho dos ativos são traduzidos em resultados do negócio?
 - a. Desempenho dos ativos são traduzidos em resultados do negócio __
 - b. Apenas avaliam-se o desempenho dos ativos sem relacionar com o negócio __
 - c. Não ocorre a avaliação do desempenho dos ativos __
6. Existe uma política, estratégias, planos, ações de controle para dirigir as atividades da gestão de ativos?
 - a. Existem apenas política, estratégias e planos orientativos __
 - b. Existem política, estratégias e planos sistematizados e periodicamente revisados __

- c. Elementos parcialmente presentes de maneira informal __
- 7. Existe uma avaliação de riscos e oportunidades em relação aos ativos da companhia?
 - a. Existe processo apenas orientativo __
 - b. Existe processo implementado de forma sistemática __
 - c. Processo informal __
- 8. A companhia declara quais são os objetivos da gestão de ativos?
 - a. Objetivos são orientativos de maneira informal __
 - b. Objetivos são declarados formalmente e periodicamente revisados __
 - c. Objetivos não são declarados __

Planejamento e Coordenação (Tático) – Fornece Direções de planejamento para atividades de controle

- 9. Existe um planejamento das atividades do ciclo de vida e atividades de suporte da solução de ativos?
 - a. Planejamento apenas para atividades do ciclo de vida __
 - b. Planejamento para as atividades do ciclo de vida e de suporte __
 - c. Planejamento aleatório de algumas atividades relacionadas aos ativos __
- 10. Existe um plano para interação entre as atividades do ciclo de vida e atividades de suporte?
 - a. Planos para alinhar necessidades de recursos humanos ao longo do ciclo de vida __
 - b. Planos para atendimento da legislação ambiental ao longo do ciclo de vida __
 - c. Planos para atendimento de requisitos de saúde e segurança ao longo do ciclo de vida __
 - d. Outros __
- 11. A companhia utiliza terceirização de atividades relacionadas aos ativos?
 - a. Terceiriza atividades do ciclo de vida e atividades de suporte __
 - b. Terceiriza apenas atividades de suporte __
 - c. Não terceiriza atividades relacionadas aos ativos __
- 12. Existem mecanismos para promover o fluxo e integração de informações?
 - a. Integração e fluxo de informações via sistema de informações __
 - b. Integração e fluxo de informações com limitações do sistema __
 - c. Não existe sistema de informações para suportar a gestão de ativos __
- 13. São definidos os KPIs da solução de ativos e seus respectivos valores alvos?
 - a. São definidos apenas os KPIs conforme o tipo do ativo __
 - b. São definidos os KPIs e os respectivos valores alvos __
 - c. Definição de KPIs e valores ocorre de maneira informal __

Controle de atividades operacionais (Operacional) – Gera Acúmulo de dados

- 14. Existe uma programação para execução das atividades do ciclo de vida e atividades de suporte da solução de ativos?
 - a. Programação de atividades do ciclo de vida __

- b. Programação das atividades do ciclo de vida e de suporte ___
 - c. Programação aleatório de algumas atividades relacionadas aos ativos ___
15. Existem instruções de trabalho para assegurar a conformidade com normas e medidas durante a execução operacional?
- a. Existem instruções e procedimentos operacionais, porém apenas orientativos _
 - b. Instruções e procedimentos operacionais são sistematizados e periodicamente revisados ___
 - c. Instruções e procedimentos operacionais são criados de forma não sistematizados, conforme o tipo de ativo e equipes de desenvolvimento etc. ___
16. Existem elementos que asseguram eficiência e eficácia da operação?
- a. Capacitação do quadro de colaboradores ___
 - b. Revisão contínua dos padrões operacionais / tecnologia dos ativos ___
 - c. Elementos de controle da operação conforme necessidades do negócio ___
 - d. Outros ___
17. Ocorre a coleta, processamento e armazenamento de dados da operação?
- a. Dados são coletados e armazenados conforme o tipo de ativo ___
 - b. Dados são coletados, processados e armazenados de maneira sistemática ___
 - c. Coleta e armazenamento de dados ocorrem de maneira aleatória ___

Medição e monitoramento (Operacional) – Fornece Feedback de indicadores de desempenho técnico

18. São reportados os parâmetros de desempenho da solução de ativos?
- a. Os parâmetros são parcialmente reportados ___
 - b. Os parâmetros de desempenho dos ativos são sistematicamente reportados ___
 - c. Os parâmetros de desempenho são reportados de forma não sistematizada, conforme necessidades específicas ___
19. Ocorre o feedback de indicadores de desempenho técnico da solução de ativos?
- a. Ocorre o feedback parcial dos indicadores de desempenho técnico ___
 - b. Ocorre o feedback sistemático de todos os indicadores de desempenho técnico ___
 - c. Feedback dos indicadores de desempenho técnico somente mediante demanda ou situações pontuais ___

Controle e reporte (Tático) – Fornece Feedback de conformidade e KPIs

20. Ocorre o controle da integração e do fluxo de informações da gestão de ativos?
- a. Controle da integração e do fluxo de informações apenas para casos pontuais ___
 - b. Controle sistemático e periódico da integração e do fluxo de informações ___
 - c. Controle da integração e do fluxo de informações inexistente ___
21. Ocorre o controle da conformidade das atividades relacionadas à gestão de ativos / Auditorias internas do sistema de gestão de ativos?
- a. Controle da conformidade apenas para casos específicos ___
 - b. Controle da conformidade sistemático e periódico via auditorias do sistema ___
 - c. Controle da conformidade das atividades inexistente ___

22. São avaliados e reportados os KPIs?
- Os KPIs são parcialmente avaliados e reportados ___
 - Os KPIs são sistematicamente avaliados e reportados ___
 - Os KPIs são avaliados e reportados somente mediante demanda ou situações pontuais ___

Análise e avaliação (Estratégico) – Fornece Direções para a tomada de decisão

23. É realizada a análise e avaliação dos gaps nos níveis de desempenho dos ativos?
- Análise e avaliação parcial dos gaps de desempenho ___
 - Análise e avaliação sistemática e periódica dos gaps de desempenho ___
 - Análise e avaliação dos gaps de desempenho somente mediante demanda ou situações pontuais ___
24. É realizada a análise e avaliação de estratégias, políticas e planos de atividades relacionadas à Gestão de Ativos?
- Análise e avaliação parcial das estratégias, políticas e planos ___
 - Análise e avaliação sistemática e periódica das estratégias, políticas e planos ___
 - Análise e avaliação das estratégias, políticas e planos somente mediante demanda ou situações pontuais ___
25. É realizada a análise e avaliação dos meios de controle?
- Análise e avaliação parcial dos meios de controle ___
 - Análise e avaliação sistemática e periódica dos meios de controle ___
 - Análise e avaliação dos meios de controle somente mediante demanda ou situações pontuais ___
26. É realizada a análise de eventos/oportunidades estratégicas relacionadas ao desempenho dos ativos?
- Análise parcial das oportunidades e eventos estratégicos ___
 - Análise sistemática e periódica das oportunidades e eventos estratégicos ___
 - Análise das oportunidades e eventos estratégicos somente mediante demanda ou situações pontuais ___
27. A companhia desenvolve alguma avaliação no nível de portfólio de ativos?
- Ocorrem avaliações informais e aleatórias no nível de portfólio de ativos ___
 - Ocorrem avaliações periódicas no nível de portfólio de ativos ___
 - Os ativos não são avaliados no nível de portfólio ___

4) Pergunta resumo:

- Em sua opinião, quais são as maiores dificuldades encontradas no processo de gestão de ativos físicos nas empresas de capital intensivo?
 - Pessoas ___
 - Sistema de integração e fluxo de informações ___
 - Estrutura/cultura organizacional ___
 - Outros ___

5) **Pergunta final questionando se há algo a ser acrescentado:**

- Há alguma outra prática atualmente executada no seu processo de Gestão de Ativos Físicos que gostaria de destacar? Algo que queira acrescentar?

Rodrigo Pessotto Almeida
rodrigopa7@hotmail.com

3.9.2 Apêndice B

Tabela 1: Resumo dos resultados obtidos a partir da avaliação dos elementos de análise nas empresas

	Empresa A	Empresa B	Empresa C	<i>Status</i>
E1	<ul style="list-style-type: none"> • Reconhece o papel estratégico da GA. • Não define como se insere o processo de GA no contexto da organização. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reconhece o papel estratégico da GA. • Define as fases do ciclo de vida e atividades de suporte para suportar a GA. • Define parcialmente a inserção do processo de GA no contexto da organização. 	<ul style="list-style-type: none"> • Não reconhece o papel estratégico da GA, apresentando apenas orientação tática e operacional da GA. • Não define como se insere o processo de GA no contexto da organização. 	Rejeitado
E2	<ul style="list-style-type: none"> • Os níveis estratégico, tático e operacional participam do processo. Ações predominantemente táticas e operacionais. • Modelo conceitual mostra-se compatível com as necessidades da organização. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os níveis estratégico, tático e operacional participam do processo de GA. Presença de ações em todos os níveis hierárquicos. • Modelo conceitual mostra-se compatível com as necessidades da organização. 	<ul style="list-style-type: none"> • Processo é formado pelos níveis tático e principalmente operacional. Ações isoladas dentro das áreas funcionais. • Modelo conceitual mostra-se compatível com as necessidades da organização. 	Aceito
E3	<ul style="list-style-type: none"> • Dispõe de uma rede para o compartilhamento de dados e informações, formada por diversos sistemas não integrados entre si. • Dados da operação são coletados, processados e armazenados em uma base, e disponibilizados para consulta de órgão regulador. • Reporte sistemático dos parâmetros de desempenho da operação. • Reporte mensal dos indicadores de desempenho do nível tático para o nível estratégico. • Processo de tomada de decisão no nível estratégico fornece orientações ao planejamento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reconhece a relevância do fluxo e integração das informações, de modo que está em fase de operacionalização a integração do sistema de informações da GA. • Dados da operação são coletados, processados e armazenados em uma base, e disponibilizados para consulta de órgão regulador. • Reporte sistemático dos parâmetros de desempenho da operação. • O processo de reporte de informações do nível tático para o estratégico está em desenvolvimento • Processo de tomada de decisão no nível estratégico fornece orientações ao planejamento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gerencia as informações utilizando seu sistema ERP e sistemas auxiliares, onde as informações são restringidas as áreas funcionais. • Dados são coletados e armazenados no sistema ERP, porém o acesso é restrito as áreas funcionais. • Reporte do desempenho operacional mensal ao nível gerencial. • Não possui um reporte sistemático do nível tático para o estratégico. • Nível estratégico não fornece orientações ao planejamento. • Desenvolve plano operacional para orientar a execução operacional (não exclusivo da GA). • Apresenta descontinuidade no fluxo de <i>feedback</i> das informações do 	Rejeitado

	<ul style="list-style-type: none"> • Desenvolve plano operacional para orientar a execução operacional (não exclusive da GA). • Apresenta descontinuidade no fluxo de <i>feedback</i> das informações do nível operacional para o nível tático, e deste para o nível estratégico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Desenvolve plano operacional para orientar a execução operacional (não exclusive da GA). • Apresenta descontinuidade no fluxo de <i>feedback</i> das informações do nível operacional para o nível tático, e deste para o nível estratégico. 	nível operacional para o nível tático, além de não reportar deste último para o nível estratégico.	
E4	<ul style="list-style-type: none"> • Apesar de existir esforço neste sentido, a tomada de decisão não adota a visão do ciclo de vida. • Reconhece a importância de a tomada de decisão abordar uma visão holística do sistema de ativos, porém na prática as decisões pouco são orientadas pela visão sistêmica. • Possui um processo formal para avaliar riscos e oportunidades dos ativos da companhia para orientar a tomada de decisão. • A orientação centrada nos dados e informações específicas dos ativos é declarada como relevante. Inclusive existe a disponibilidade de dados, porém a dificuldade de acesso a estes dados leva muitas vezes a tomada de decisão não contemplar todos os aspectos importantes desta abordagem. 	<ul style="list-style-type: none"> • Está sendo estruturado o processo para que a tomada de decisão passe a ser orientada pelo ciclo de vida do ativo. • A organização reconhece a importância de a tomada de decisão abordar uma visão holística do sistema de ativos, porém na prática as decisões pouco são orientadas pela visão sistêmica. Esforços têm sido dirigidos neste sentido. • Possui um processo formal para avaliar riscos e oportunidades dos ativos da companhia para orientar a tomada de decisão. • A orientação centrada nos dados e informações específicas dos ativos é declarada como relevante. Inclusive existe a disponibilidade de dados, porém a dificuldade de acesso a estes dados leva muitas vezes a tomada de decisão não contemplar todos os aspectos importantes desta abordagem. 	<ul style="list-style-type: none"> • A tomada de decisão não é orientada pelo ciclo de vida do ativo. • A importância de a tomada de decisão abordar uma visão holística do sistema de ativos é compartilhada por alguns gestores, porém na prática as decisões pouco são orientadas pela visão sistêmica. • Ações isoladas de avaliação de riscos operacionais orientadas a alguns ativos específicos. • A orientação centrada nos dados e informações específicas dos ativos é declarada como relevante. Inclusive existe a disponibilidade de dados, porém a dificuldade de acesso a estes dados leva muitas vezes a tomada de decisão não contemplar todos os aspectos importantes desta abordagem. 	Rejeitado

4 ARTIGO 3 – Como avaliar investimentos em tecnologias da Indústria 4.0? Um framework multicritério para fatores econômicos, financeiros e sociotécnicos

Rodrigo Pessotto Almeida
Néstor Fabián Ayala
Guilherme Brittes Benitez
Francisco José Kliemann Neto
Alejandro Germán Frank

Resumo

As empresas que desejam adotar as tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) podem enfrentar dificuldades para avaliar o retorno desses investimentos. A complexidade de implementação de tais tecnologias e as incertezas quanto aos requisitos tecnológicos, benefícios e impactos organizacionais tornam as decisões de investimento desafiadoras neste contexto. Propomos um framework de avaliação de investimentos para a adoção de tecnologias I4.0 baseado em uma abordagem de tomada de decisão multicritérios (MCDM). Usando as teorias da Difusão da Inovação e Sociotécnica, propomos um framework composto por três estágios principais (conhecimento, persuasão e decisão) para orientar os profissionais por meio da análise de investimentos em I4.0 a partir de três perspectivas: fatores econômicos, financeiros e sociotécnicos. Fornecemos critérios conceituais para a avaliação de investimentos e uma abordagem metodológica para combinar dados quantitativos e qualitativos. Nós apresentamos uma aplicação empírica do framework proposto para avaliar dez projetos de investimentos em tecnologias I4.0 em uma empresa multinacional. O estudo de caso ajuda a ilustrar o uso desta ferramenta. Ele também traz novos insights práticos, como a forma de organizar projetos de investimento I4.0 em investimentos estratégicos ou estruturantes, de criação de valor e laterais. Também mostramos a necessidade de incluir vários requisitos e benefícios qualitativos na avaliação da tecnologia para obter uma visão mais robusta das prioridades de investimento na Indústria 4.0.

Palavras-chave: Indústria 4.0, Avaliação de investimentos, Sociotécnica, Econômica, Financeira.

Abstract

Companies that want to adopt Industry 4.0 (I4.0) technologies may face difficulties evaluating the return on I4.0 investments. The complexity of implementing such technologies and uncertainties regarding the technological requirements, benefits, and organizational impacts make investment decisions challenging in this context. We propose an investment appraisal framework for I4.0 technologies adoption based on a multiple-criteria decision making (MCDM) approach. Using the Innovation Diffusion and Sociotechnical theories, we build a framework with three main stages (knowledge, persuasion, and decision) to guide practitioners through an analysis of I4.0 investments from three different perspectives: Economic, Financial, and Sociotechnical factors. We provide conceptual criteria for investment appraisal and a methodological approach to combine quantitative and qualitative data for the comparative assessment. We show an empirical application of this framework to assess ten I4.0 technology projects proposed in a multinational company. The application helps to illustrate the use of this tool. It brings new practical insights into how to organize I4.0 investment projects into the following categories: strategic or structuring, value-creating, and side investments. We also show the need to include several qualitative requirements and benefits in the technology evaluation to obtain a more robust view of Industry 4.0 investment priorities.

Keywords: Industry 4.0, Investment assessment, Sociotechnical, Economic, Financial.

4.1 Introdução

A transformação digital alavancada por tecnologias avançadas levou ao estabelecimento de um novo estágio industrial, a chamada quarta Revolução Industrial ou Indústria 4.0 (I4.0) (Schuh *et al.* 2020; Klingenberg, Borges e Antunes 2019). Essa difusão tecnológica nas indústrias de manufatura promove um ambiente conectado entre dados, pessoas, ativos industriais, recursos, processos, serviços e sistemas (Ghobakhloo, 2019). A adoção de tecnologias I4.0 pode fornecer benefícios abrangentes ao setor de manufatura, como incremento em eficiência, produtividade, qualidade e flexibilidade (Bednar e Welch 2019; Veile *et al.* 2019).

A difusão crescente e a promessa de benefícios consideráveis (Dalenogare *et al.* 2018) levaram um número crescente de empresas de manufatura a lidar com o desafio de tomar decisões de investimento dentro do contexto I4.0 (Cheng *et al.* 2018). Devido à natureza complexa das tecnologias I4.0 (Benitez, Ayala e Frank 2020), muitas empresas enfrentam dificuldades em avaliar os reais benefícios da adoção dessas tecnologias (Beier *et al.* 2020). Os investimentos em tecnologias I4.0 estão associados a riscos e, portanto, requerem uma abordagem multidisciplinar para avaliar os ganhos potenciais de sua adoção (Bednar e Welch 2019). Além disso, as decisões sobre a adoção de tecnologias I4.0 não devem ser reduzidas apenas a aspectos técnicos (Frank, Dalenogare e Ayala 2019), pois I4.0 é um conceito sociotécnico no qual os aspectos tecnológicos, sociais e ambientais interagem fortemente (Sony e Naik 2020; Beier *et al.* 2020).

No entanto, embora os estudiosos tenham se concentrado em investigar os níveis de adoção em empresas de manufatura (por exemplo, Frank, Dalenogare e Ayala 2019; Veile *et al.* 2019), construindo modelos de maturidade para implementação de I4.0 (por exemplo, Lu e Weng 2018; Schuh *et al.* 2020; Wagire *et al.* 2020), explorando os benefícios esperados das tecnologias I4.0 (por exemplo, Dalenogare *et al.* 2018; Ghobakhloo 2019) e até mesmo testando seu efeito positivo na lucratividade da empresa (por exemplo, Lin, Wu e Song 2019; Veile *et al.* 2019), faltam estudos que abordem a avaliação de investimentos neste contexto (Oesterreich e Teuteberg 2016; Beier *et al.* 2020). Estudos existentes propondo ferramentas de avaliação para investimentos em tecnologias avançadas de manufatura (por exemplo, Tan *et al.* 2006; Evans, Lohse e Summers 2013; Bai e Sarkis 2017) ou tecnologias I4.0 (por

exemplo, Kamble *et al.* 2020; Dreyer *et al.* 2020) apresentam limitações na abordagem por estarem restritas às dimensões econômicas e operacionais tradicionais, desconsiderando a integração necessária entre as tecnologias I4.0 e os sistemas existentes, bem como o impacto dessas tecnologias nas pessoas e nos aspectos organizacionais. Além disso, a literatura (Bai *et al.* 2020; Benitez, Ayala e Frank 2020) aponta com frequência a dificuldade de medir o retorno sobre os investimentos (ROI) e o Payback ao avaliar projetos da Indústria 4.0, não fornecendo um ponto de partida claro para os gestores no processo de tomada de decisão para adoção da tecnologia I4.0. Portanto, essa lacuna na literatura abre caminho para estudos que visam orientar a avaliação de investimentos no contexto I4.0, levando-nos à seguinte questão de pesquisa: *como avaliar investimentos em tecnologias da Indústria 4.0 em empresas de manufatura?*

Conforme declarado, a resposta a esta pergunta deve considerar a complexidade multidisciplinar da implementação das tecnologias I4.0 (Sony e Naik 2019) e o fato de que os objetivos da manufatura alcançados com a adoção dessas tecnologias estão na intersecção entre pessoas, tecnologias e inovação (Marcon *et al.* 2021; Kamble *et al.* 2020). Assim, neste estudo, combinamos duas lentes teóricas, a Teoria da Difusão da Inovação (IDT) e a Teoria Sociotécnica (STS), para propor um framework para orientar a decisão de investimentos para a adoção de tecnologias da Indústria 4.0. Com base na Teoria da Difusão da Inovação, um arcabouço conceitual foi estruturado em três etapas para o processo de decisão da inovação (Rogers 2003): (i) conhecimento, (ii) persuasão e (iii) decisão. Estas são as etapas até que a empresa decida se deve adotar ou rejeitar uma inovação (Rogers 2003). Em seguida, com base na Teoria Sociotécnica (Marcon *et al.* 2021), propomos uma dimensão sociotécnica para complementar as perspectivas financeiras e econômicas tradicionais, levando a uma função matemática combinando-as em um índice integrativo geral do investimento. Este índice integrativo representa o retorno esperado do investimento, que pode priorizar e apoiar a decisão de adotar ou rejeitar potenciais investimentos em tecnologia I4.0. Em seguida, testamos o framework proposto em uma empresa de manufatura com larga experiência na adoção de tecnologias I4.0. Como resultado, verificamos que embora as dimensões econômica e financeira predominem nas decisões de investimento, incluir a perspectiva sociotécnica pode alterar a decisão de investimento. Nosso estudo de caso revelou que combinar as três perspectivas em um índice geral é oportuno quando os gestores desejam avaliar aspectos não financeiros e não econômicos para adoção de tecnologias.

4.2 Fundamentação teórica

4.2.1 Literatura atual sobre avaliação de investimentos em indústria 4.0

Antes do surgimento do conceito de Indústria 4.0, a adoção de tecnologias para sistemas de manufatura havia sido discutida na literatura de *Advanced Manufacturing Technology* (AMT) (Sambasivarao e Deshmukh 1997; O'Brien e Smith 1993). Dada a relevância dessas tecnologias para a competitividade das empresas (Cheng *et al.* 2018), a questão da seleção e justificativa de investimentos em AMTs tem sido amplamente abordada por pesquisadores ao longo do tempo (Ordoobadi 2012; Zhou *et al.* 2009; Kakati 1997; Bai e Sarkis 2017; Tan *et al.* 2006; Sambasivarao e Deshmukh 1997). Primeiro, Meridith e Surksh (1986) propuseram classificar as técnicas para avaliação de investimentos em tecnologias nas perspectivas econômica, analítica e estratégica. Além disso, os autores indicam as condições em que é mais adequado empregar cada técnica. Adicionalmente, Sambasivarao e Deshmukh (1997) apresentaram um sistema de apoio à decisão integrando análise multi-atributo, análise econômica e avaliação de risco. Da mesma forma, Tan *et al.* (2006) apresentam um sistema de apoio à decisão integrando o raciocínio baseado em casos e uma técnica de redes neurais fuzzy. Além disso, Evans, Lohse e Summers (2013) usaram uma abordagem baseada em experiência para propor uma árvore de decisão difusa para justificar investimentos em tecnologias de manufatura. Kakati (1997), por sua vez, apresentou um método que integra os principais fatores de competitividade externos como alternativa às metodologias de avaliação que subestimam os benefícios obtidos com a adoção de novas tecnologias. Buscando tornar as decisões de investimento em AMT mais ambientalmente conscientes, Bai e Sarkis (2017) desenvolveram um modelo híbrido de decisão de múltiplos critérios, integrando a teoria *neighborhood rough set* e a teoria *cumulative prospect* com base em um número cinza de intervalo de três parâmetros.

No entanto, os modelos existentes de AMT e Indústria 4.0 têm algumas limitações. Primeiro, a maioria dos modelos não considera a premissa de que as soluções tecnológicas I4.0 terão que ser integradas aos sistemas de produção existentes (Felsberger *et al.* 2020; Cheng *et al.* 2018). Essa integração requer uma abordagem que ajudará a avaliar e otimizar

o relacionamento complexo entre as tecnologias I4.0 (Tabim *et al.*, 2021; Davis *et al.* 2014; Bednar e Welch 2019). Em segundo lugar, os modelos existentes geralmente negligenciam critérios sociotécnicos, como pessoas, estrutura organizacional e contexto do ambiente onde as tecnologias I4.0 serão implementadas (Marcon *et al.* 2021). No entanto, as soluções I4.0 são geralmente complexas (Frank, Dalenogare e Ayala 2019) e seu impacto não se limita aos aspectos técnicos. Assim, fatores humanos e organizacionais são muito relevantes para uma implementação bem-sucedida dessas tecnologias em sistemas de manufatura (Dornelles *et al.*, 2021; Tabim *et al.*, 2021; Dalenogare *et al.* 2018). Portanto, propomos um novo framework multicritério que considera fatores econômicos, financeiros e sociotécnicos na avaliação de projetos de adoção de tecnologias I4.0.

4.2.2 Tecnologias da Indústria 4.0 e o processo de decisão da inovação

No contexto da Teoria da Difusão da Inovação (IDT), a inovação pode ser definida como uma ideia, prática ou objeto percebido como novo por uma organização, como novas tecnologias ou novos usos das mesmas (Rogers 2003). Nesse sentido, I4.0 pode ser entendido como um conjunto de tecnologias inovadoras e digitais emergentes que fornecem novo valor para clientes e organizações (Pacchini *et al.* 2019), criando soluções com potencial para transformar processos, produtos e serviços (Ghobakhloo 2018). Tal inovação é apoiada pela integração de tecnologias estabelecidas, como sensores e redes sem fio, com as emergentes, como a Internet Industrial das Coisas (IIoT), Inteligência Artificial (IA), impressão 3D e análise de big data (Lu e Weng 2018; Klingenberg, Borges e Antunes 2019).

Desde que o conceito foi cunhado em 2011, a implementação das tecnologias I4.0 ganhou grande relevância (Meindl *et al.* 2021). No entanto, os profissionais têm sido desafiados para decidir qual das muitas aplicações possíveis das tecnologias I4.0 é a mais adequada para eles (Dalenogare *et al.* 2018; Dalenogare *et al.* 2019; Frank, Dalenogare e Ayala 2019), apontando para o processo de decisão de adoção de tecnologias como um dos principais desafios para as empresas de manufatura (Tabim *et al.* 2021; Felsberger *et al.* 2020; Bai *et al.* 2020; Dreyer *et al.* 2020). Para enfrentar esse desafio, adotamos o modelo do processo de decisão da inovação proposto por Rogers (2003) e derivado da IDT. A IDT de Rogers é adequada para a análise de decisões de adoção de tecnologias, conforme

observado em vários artigos da área de gestão de operações (por exemplo, Simões, Soares e Barros 2020; Wei, Lowry e Seedorf 2015), especialmente aqueles relacionados à tecnologia da informação (por exemplo, Bose e Luo 2011; Alshamaila, Papagiannidis e Li 2013). Mais especificamente, o modelo do processo de decisão da inovação tem sido empregado por muitos estudiosos para lançar luz sobre a adoção de tecnologias – por exemplo, tecnologias de informação verdes (Bose e Luo 2011), tecnologias de casas inteligentes (SHT) (Sanguinetti, Karlin e Ford 2018), e tecnologias de gerenciamento de relacionamento com o cliente (CRM) (Nguyen e Waring 2013) – porque oferece um guia claro das principais etapas que devem ser observadas para decidir sobre tecnologias inovadoras.

O modelo do processo de decisão da inovação compreende cinco etapas. As três primeiras referem-se à avaliação da decisão de adoção ou rejeição, e as duas últimas referem-se à análise pós-implementação. Assim, o nosso estudo centra-se apenas nas três primeiras fases – relativas à avaliação do investimento – uma vez que, para passar à quarta fase, as empresas necessitam de ter efetivamente realizado os investimentos de implementação. A primeira etapa, denominada conhecimento, abrange o conhecimento que as empresas devem ter sobre a tecnologia desejada para analisar as vantagens e desvantagens de sua adoção. Na segunda etapa, denominada persuasão, a organização assume uma atitude favorável ou desfavorável (sobre investir ou não) em relação à tecnologia avaliada. No terceiro estágio, denominado decisão, a empresa decide se adotará ou rejeitará a tecnologia inovadora. Recentemente, Tabim *et al.* (2021) propuseram a utilização desse modelo com suas três etapas no contexto da Indústria 4.0 para apoiar a adoção de sistemas de informação visando a integração vertical. Embora este estudo seja um dos primeiros no domínio da Indústria 4.0 que segue tal abordagem, os autores consideraram apenas os fatores organizacionais envolvidos no processo de decisão da inovação e não as atividades de avaliação de investimentos necessárias para a adoção final.

4.2.3 Teoria sociotécnica para avaliação de investimentos em tecnologias da Indústria 4.0

Frequentemente as empresas baseiam as decisões de investimentos em critérios financeiros ou econômicos usando técnicas amplamente exploradas na literatura econômica, como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e período de retorno

(Bai e Sarkis 2017). No entanto, essas técnicas ignoram os impactos nos aspectos sociotécnicos presentes no contexto I4.0, que podem comprometer o retorno do investimento de uma empresa de manufatura (Cheng *et al.* 2018).

A inter-relação entre seres humanos, elementos tecnológicos e o ambiente de trabalho em sistemas de manufatura pode ser descrita como sistemas sociotécnicos. De acordo com Cherns (1976), a Teoria Sociotécnica é frequentemente usada para descrever a complexa interação entre aspectos sociais e tecnológicos e os ambientes organizacional e externo. As soluções da Indústria 4.0 tendem a ser sistemas particularmente complexos, pois integram tecnologias como IoT, Cloud, Big Data e Inteligência Artificial com seus arredores (Benitez *et al.* 2021; Benitez, Ayala e Frank 2020), tendo implicações e sendo impactados por aspectos econômicos, sociais, técnicos, organizacionais e ambientais (Masood e Egger 2019; Lu e Weng 2018; Enrique *et al.* 2018). Como afirmaram Bednar e Welch (2019) e Sony e Naik (2020), as abordagens de sistemas sociotécnicos são a melhor maneira de avaliar os benefícios potenciais das tecnologias I4.0 nas organizações. Isso também foi demonstrado recentemente por Marcon *et al.* (2021) por meio de evidências empíricas em 241 empresas, onde aquelas empresas preocupadas com fatores sociotécnicos durante a jornada da Indústria 4.0 alcançaram níveis mais altos de maturidade na adoção de tecnologias da Indústria 4.0. Além disso, Tabim *et al.* (2021) consideraram fatores tecnológicos, organizacionais e ambientais durante a seleção de sistemas de informação para a Indústria 4.0, mostrando as potenciais tensões entre esses fatores que precisam ser avaliadas. Nesse sentido, uma lente sociotécnica permite olhar para a implementação das tecnologias I4.0 não apenas como novos equipamentos que as pessoas devem ser treinadas para usar, mas em toda a sua complexidade. Esta lente também pode orientar a adoção e implementação otimizada de tecnologias I4.0 para atender às necessidades tecnológicas de uma organização (Sony e Naik 2019; Lu e Weng 2018).

Nessa perspectiva, é possível notar que as decisões de investimento em I4.0 precisam avaliar simultaneamente aspectos como treinamento de pessoas, aceitação de funcionários, segurança da informação, padronização de protocolos industriais e normas e regulamentos (Kagermann, Wahlster e Helbig 2013; Oesterreich e Teuteberg 2016). Aspectos como a extensibilidade de funcionalidades relacionadas ao produto ou processos de fabricação por meio da introdução de soluções tecnológicas também devem ser avaliados (Agostini e Nosella 2019). Além disso, os investimentos em tecnologias podem trazer outros

benefícios mais difíceis de serem medidos. Por exemplo, a interoperabilidade e conectividade de máquinas resultam em interdependência em fábricas e processos de manufatura, aumentando a complexidade de avaliar os benefícios e impactos dessas mudanças nos sistemas de produção (Dreyer *et al.* 2020). Esses aspectos revelam uma dificuldade em determinar a rentabilidade de um investimento no contexto I4.0.

Assim, a incerteza e a complexidade dos investimentos em tecnologias I4.0 é um problema atual enfrentado por muitas empresas de manufatura e constantemente destacado por estudiosos (por exemplo, Benitez, Ayala e Frank 2020; Bosman, Hartman e Sutherland 2019). Um desafio recorrente para essas empresas é avaliar o ROI das tecnologias nos estágios iniciais para auxiliar na tomada de decisões (Bosman, Hartman e Sutherland 2019; Cheng *et al.* 2018). Nesse sentido, é necessário adotar métodos que abordem conjuntamente aspectos sociotécnicos (Marcon *et al.* 2021; Beier *et al.* 2020), econômicos e financeiros (Frank *et al.* 2013), conforme proposto na próxima seção.

4.3 Framework proposto

O framework proposto para apoiar as decisões de investimento em tecnologias I4.0 foi desenvolvido combinando duas lentes teóricas: enquanto o modelo do processo de decisão da inovação da IDT foi usado para estruturar as etapas do framework, a Teoria Sociotécnica (STS) foi adotada para avaliar o impacto da adoção de tecnologias I4.0 em sistemas de manufatura. Conforme mostrado na Figura 1, nosso framework proposto é baseado nos três primeiros estágios do processo de decisão da inovação proposto por Rogers (2003): (i) conhecimento, (ii) persuasão e (iii) decisão. Na primeira etapa (i), são avaliados os objetivos estratégicos e as condições prévias da organização em termos de inovação tecnológica. Com a compreensão desses aspectos, são desenvolvidos potenciais investimentos em tecnologia. Na segunda etapa (ii), o framework avalia a viabilidade e as consequências da adoção de tecnologias I4.0 sob as perspectivas Sociotécnica, Econômica e Financeira. Na terceira fase (iii), a decisão final é suportada pela determinação de um índice integrativo, combinando as três perspectivas em análise, que expressa o ROI esperado do potencial investimento tecnológico. Essas etapas abrangem as atividades de busca e processamento de informações para as organizações reduzirem as incertezas sobre as

vantagens e desvantagens de implementar a nova tecnologia I4.0. As próximas subseções detalham todos os aspectos que devem ser avaliados em cada uma das três etapas do nosso framework (Figura 1).

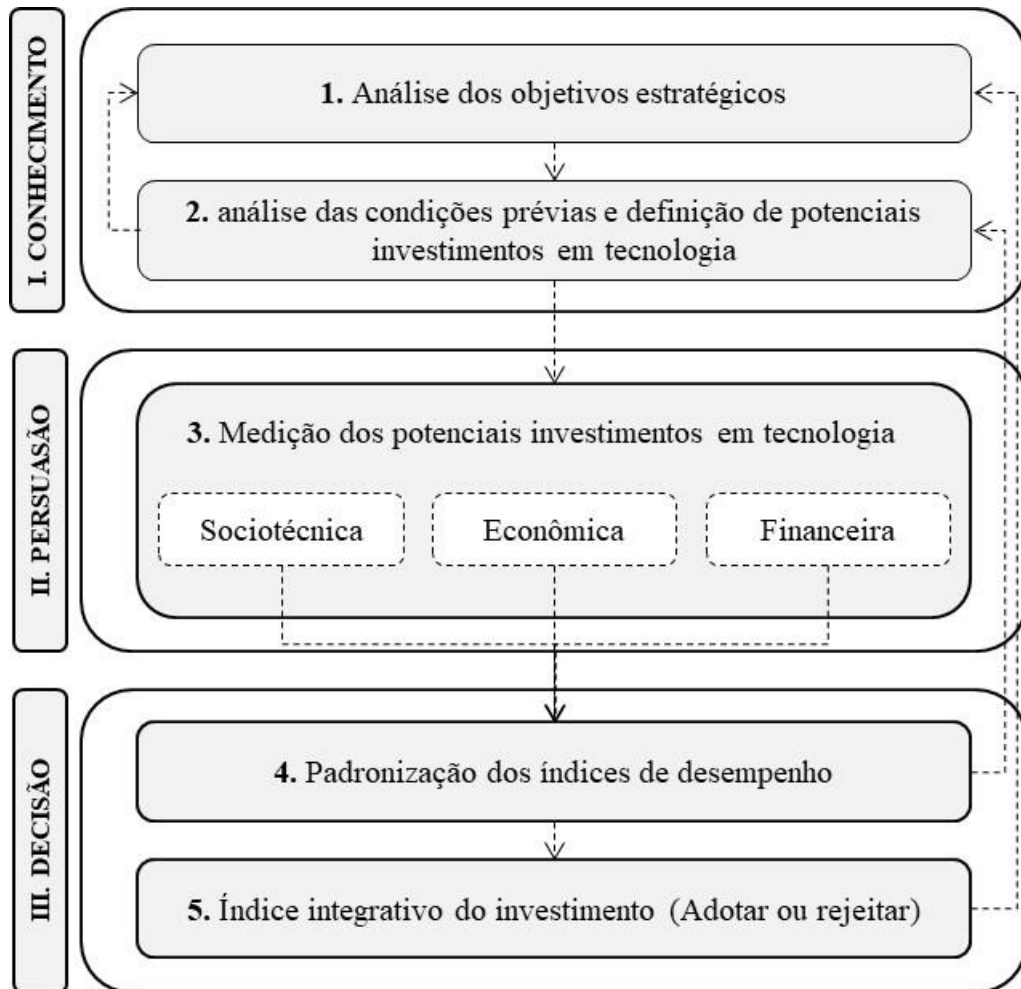


Figura 1: Framework para análise de investimentos em tecnologias

4.3.1 Conhecimento

O estágio do conhecimento refere-se ao período em que uma empresa tem predisposição para estudar uma determinada inovação tecnológica, desenvolvendo um certo nível de entendimento sobre essa tecnologia (Rogers 2003). Assim, nesta etapa, o framework aborda aspectos relacionados ao desenvolvimento de projetos de investimentos adequados em tecnologias I4.0 alinhados com a estratégia, maturidade e potencial da empresa para

trazer mais competitividade ao seu sistema de manufatura. Para tanto, essa etapa está dividida em duas etapas: (i) análise dos objetivos estratégicos; e (ii) análise das condições prévias e definição de potenciais investimentos em tecnologia.

4.3.1.1 Análise dos objetivos estratégicos

Antes de adotar qualquer tecnologia, as empresas que buscam iniciar sua jornada em direção à Indústria 4.0 precisam determinar seus objetivos estratégicos (Stentoft *et al.* 2020; Dalenogare *et al.* 2018). Portanto, esta etapa pressupõe a existência de um alinhamento estratégico com a implementação da tecnologia. Em outras palavras, que a empresa tenha definido um roadmap estratégico para a Indústria 4.0 (Lu e Weng 2018; Ghobakhloo 2018). Nesta etapa, a empresa também avalia seu atual estágio de desenvolvimento tecnológico e seu objetivo final (Schuh *et al.* 2020). Assim, a empresa pode priorizar as tecnologias I4.0 para implementação (Frank, Dalenogare e Ayala 2019). Finalmente, após selecionar as tecnologias alinhadas com suas estratégias, a empresa pode abordar o cumprimento das condições necessárias para adotar com sucesso as tecnologias I4.0 selecionadas (Pacchini *et al.* 2019).

4.3.1.2 A análise das condições prévias e definição de potenciais investimentos em tecnologia

Esta etapa aborda aspectos relacionados ao grau de prontidão organizacional para a adoção de tecnologias I4.0. Para esta etapa, é necessário coletar as principais informações técnicas e operacionais da solução junto aos potenciais provedores. As informações técnicas devem fornecer todos os pré-requisitos e detalhes sobre o modus operandi da tecnologia (Pacchini *et al.* 2019). Segundo Rogers (2003), esses requisitos são chamados de condições prévias, que levam a organização a avaliar os pré-requisitos para a adoção de uma tecnologia. Conforme observado por Pacchini *et al.* (2019), as tecnologias da Indústria 4.0 estão inter-relacionadas, e algumas delas podem precisar de tecnologias anteriores como pré-requisito para considerar sua implementação. Por exemplo, uma empresa não deve analisar

investimentos na implementação de big data sem a implementação prévia de uma infraestrutura para sistemas digitais (Pacchini *et al.* 2019).

No entanto, se a empresa não estiver pronta para implementar a tecnologia desejada, isso não significa que ela deva desistir dela. Significa apenas que primeiro a tecnologia pré-requisito deve ser avaliada e implementada, e só então a tecnologia subsequente deve ser avaliada, ou ainda que ambas as tecnologias sejam inter-relacionadas, estas devem ser avaliadas em conjunto. A partir dessa análise, será possível definir o potencial de investimento na tecnologia, que pode envolver uma única tecnologia ou um conjunto de tecnologias em uma solução customizada às necessidades da empresa (Klingenberg, Borges e Antunes 2019).

4.3.2 Persuasão

O estágio de persuasão é quando a organização forma uma atitude favorável ou desfavorável em relação à adoção da nova tecnologia (Rogers 2003). Nesse sentido, conforme justificado na seção 2, este estudo emprega uma abordagem sociotécnica para avaliar as consequências esperadas da adoção de tecnologias I4.0. Assim, cada alternativa de investimento é medida com base em três indicadores que formam um índice integrativo. Este índice fornece uma avaliação multicritério combinando as perspectivas sociotécnica (Beier *et al.* 2020), econômica e financeira (Frank *et al.*, 2013). Nas próximas subseções, essas perspectivas são apresentadas.

4.3.2.1 Dimensão Sociotécnica

O sucesso na adoção de novas tecnologias avançadas requer uma abordagem sociotécnica (Marcon *et al.* 2021; Gillani *et al.* 2020; Beier *et al.* 2020), que envolve quatro dimensões: Social, Tecnologia, Organização e Ambiente (Hendrick e Kleiner 2001). Essas quatro dimensões foram adotadas anteriormente por Marcon *et al.* (2021) no contexto da Indústria 4.0. O estudo demonstrou que todos eles têm uma contribuição significativa para alcançar um maior nível de adoção das tecnologias da Indústria 4.0. A dimensão Social

explora a relação entre pessoas e tecnologias, abordando as transformações causadas pelas tecnologias e o papel das pessoas na adoção da tecnologia (Kadir, Broberg e Souza 2019; Dalenogare *et al.* 2018). A dimensão tecnológica explora as características específicas da tecnologia em análise, abordando aspectos que influenciam a adoção, como, por exemplo, complexidade, compatibilidade e interoperabilidade com os sistemas existentes (Masood e Egger 2019). A dimensão organização aborda as características e condições fornecidas pelo contexto organizacional em termos de recursos, processos organizacionais e estrutura que podem influenciar a adoção das tecnologias (Masood e Egger 2019). Por fim, a dimensão ambiental expande a análise para avaliar a influência do ambiente externo, incluindo, por exemplo, governo, regulamentações e mercado (Yeh e Chen 2018; Masood e Egger 2019).

Para selecionar os fatores que devem ser abordados em cada dimensão sociotécnica do framework, primeiro realizamos uma revisão sistemática da literatura (SLR) seguindo o método PRISMA (Moher *et al.* 2015). Detalhes sobre este procedimento são fornecidos no Apêndice A. Após os procedimentos SLR, 32 artigos foram estudados individualmente para compilar uma lista inicial de 15 fatores sociotécnicos relacionados à implementação de tecnologias avançadas. Em seguida, os fatores foram submetidos à avaliação de cinco especialistas acadêmicos e quatro especialistas da indústria em duas sessões de workshop separadas (detalhes sobre os especialistas são fornecidos no Apêndice B). Durante esses workshops, os especialistas discutiram qualitativamente os fatores. Três fatores foram excluídos por não serem totalmente adequados ao contexto I4.0 ou por medirem aspectos sociotécnicos semelhantes. Além disso, alguns fatores foram reformulados para esclarecimento e para melhor adequação ao contexto I4.0. Assim, uma lista final de 12 fatores foi submetida a uma segunda rodada de avaliação pelos nove especialistas, desta vez individualmente, sendo que todos aprovaram a lista sem modificações. A Tabela 1 apresenta a lista final composta por 12 fatores considerados adequados para avaliação da perspectiva sociotécnica e os artigos onde são citados.

Tabela 1: Dimensões e critérios sociotécnicos

			Referências																			
	Critério	Descrição	(Contador <i>et al.</i> 2020)	(Davies, Coole, and Smith 2017)	(Ghobakhloo and Ching 2019)	(Ghobakhloo 2019)	(Herceg <i>et al.</i> 2020)	(Horváth and Szabó 2019)	(Hoyer, Gunawan, and Reaiche 2020)	(Kamble, Gunasekaran, and Sharma 2018)	(Kiel <i>et al.</i> 2017)	(Kumar, Singh, and Chandel 2018)	(Masood and Egger 2019)	(Moktadir <i>et al.</i> 2018)	(Müller, Kiel, and Voigt 2018)	(Rai <i>et al.</i> 2020)	(Sony and Naik 2019)	(Stentoft <i>et al.</i> 2020)	(Veile <i>et al.</i> 2019)	(Wagire <i>et al.</i> 2020)	(Yeh and Chen 2018)	
Tecnologia	Maturidade tecnológica (T1)	A capacidade da empresa de alavancar intencionalmente tecnologias, canais e habilidades digitais para apoiar a transformação de seus processos e do negócio como um todo.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Complexidade tecnológica (T2)	Nível de complexidade para a implementação e uso da tecnologia I4.0 proposta.							X	X												X
	Compatibilidade tecnológica (T3)	O grau em que a tecnologia I4.0 proposta é consistente com a infraestrutura, processos, valores, cultura e outras práticas existentes da empresa.			X	X	X			X	X		X	X						X		X
Organização	Prontidão do sistema de produção (O1)	O nível de prontidão do sistema de fabricação para a implementação da tecnologia I4.0 proposta.	X	X	X	X	X	X	X			X		X	X	X	X		X	X	X	X
	Estrutura organizacional (O2)	O grau em que a estrutura atual da empresa apoia a implementação e o uso da tecnologia I4.0 proposta.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Processos organizacionais (O3)	O impacto da tecnologia I4.0 proposta nos processos e procedimentos da organização.	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X		X		X		X	X	
Ambiente	Pressão competitiva (E1)	O impacto da tecnologia I4.0 proposta na competitividade da empresa.	X	X	X		X	X	X		X				X		X	X				X
	Conformidade regulatória (E2)	O impacto da tecnologia I4.0 proposta em relação à conformidade regulatória.								X						X		X				
	Condições do fornecedor (E3)	O nível de acessibilidade e treinamento dos fornecedores da tecnologia I4.0 proposta.	X	X	X						X		X		X					X	X	
Social	Condições de trabalho (S1)	O impacto da tecnologia I4.0 proposta nas condições de trabalho dos funcionários.		X		X	X		X		X			X	X	X	X		X	X		
	Aceitação das novas tecnologias pelas pessoas (S2)	O grau de aceitabilidade da tecnologia I4.0 proposta.	X	X		X	X	X			X		X	X	X	X	X	X				X
	Habilidades e competências da força de trabalho (S3)	O impacto da tecnologia I4.0 proposta em termos da necessidade dos funcionários por habilidades e competência.	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X

Conforme observado na Tabela 1, os fatores sociotécnicos possuem uma característica fundamental, ou seja, medem o grau de prontidão da empresa em adotar a tecnologia analisada. Conforme demonstrado por Gillani *et al.* (2020), os aspectos sociotécnicos são antecedentes que impactam a implementação de tecnologias de manufatura digital pela empresa. Como consequência da correta implementação das tecnologias, a empresa obtém melhores indicadores de desempenho que podem ser medidos em termos de resultados financeiros e econômicos. Além disso, como sugerido por Sony e Naik (2020), para a implementação bem-sucedida e sustentável da Indústria 4.0, é desejada a otimização conjunta de fatores técnicos, organizacionais, sociais e ambientais.

Assim, para medir as consequências esperadas de investimentos alternativos em tecnologias em cada critério sociotécnico, este estudo utiliza uma escala inteira de 1 a 5. Assim, as consequências esperadas desejáveis (DC_i) e indesejáveis (UC_i) para o critério i são julgadas por especialistas e recebem uma pontuação desta escala de acordo com seu impacto. Para os casos em que os impactos são inexistentes ou baixos, os critérios recebem uma pontuação de 1 ou 2, respectivamente. Por outro lado, se os impactos forem julgados altos ou muito altos, a pontuação atribuída deve ser 4 ou 5, respectivamente. As Equações 1 e 2 são usadas para determinar as consequências desejáveis totais (DC') e as consequências indesejáveis totais (UC'), respectivamente. O índice j refere-se às dimensões sociotécnicas. Assim, $j = 1$ (Tecnologia), 2 (Organização), 3 (Ambiental) ou 4 (Social). O índice i refere-se aos critérios dentro de cada dimensão j e $i = 1, 2$ ou 3 . Da mesma forma, ws_i é o peso do critério i dentro da dimensão sociotécnica j . Por outro lado, Y_j é o peso de cada dimensão sociotécnica j para determinar o valor do Impacto sociotécnico (STS_i). Para determinar o peso da importância para cada dimensão e critério são necessárias comparações pareadas seguindo o Analytic Hierarchy Process (AHP) (Saaty 2004).

$$DC' = \sum_{j=1}^{j=4} Y_j * \left(\sum_{i=1}^{i=3} ws_i * DC_i \right) \quad \text{(Equação 1)}$$

$$UC' = \sum_{j=1}^{j=4} Y_j * \left(\sum_{i=1}^{i=3} ws_i * UC_i \right) \quad \text{(Equação 2)}$$

Para determinar o STS_i , que representa a razão entre o total de consequências desejáveis e indesejáveis, este estudo adota uma adaptação da análise utilizada por Zhu *et al.* (2018). Os

autores calculam a razão de benefício e oportunidade para avaliações de custo e risco. Assim, o valor STS_i é calculado a partir da Equação 3.

$$STS_i = \frac{DC'}{UC'} \quad (\text{Equação 3})$$

Esta perspectiva analítica permite que aspectos não monetários, normalmente difíceis de serem expressos em unidades monetárias, sejam inseridos no processo de tomada de decisão, numa perspectiva sociotécnica. Porém, como a avaliação em termos monetários é uma abordagem tradicionalmente utilizada pelas organizações, este estudo inclui as perspectivas econômicas e financeiras (Frank *et al.*, 2013), que são discutidas nas subseções seguintes.

4.3.2.2 Dimensões Econômica e Financeira

Embora alguns estudos abordem as dimensões financeira e econômica como uma única dimensão (e.g., Chan *et al.* 2001; Sambasivarao e Deshmukh 1997), neste estudo, seguimos outros que apresentam essas dimensões como complementares (e.g., Kessler 2013; Copeland, Weston, e Shastri 2004; Lefley 1996). De acordo com essa visão, enquanto a avaliação econômica é uma análise comparativa para determinar em que investir, com base na lucratividade, a avaliação financeira aborda as necessidades e a disponibilidade de recursos para realizar o investimento (Kessler 2013; Copeland, Weston e Shastri 2004; Lefley 1996). Em outras palavras, a avaliação econômica é baseada nos custos de oportunidade, enquanto a avaliação financeira é baseada nos custos explícitos pagos pelas empresas (Atkinson *et al.* 2012; Mankiw e Taylor 2006). Para a dimensão econômica, utilizamos o método do Valor Presente Líquido (VPL) para avaliar as alternativas de investimento (Frank *et al.*, 2013). O VPL avalia a diferença entre o valor do fluxo de caixa atual para t períodos do projeto (FC_t) comparando receitas e despesas ao longo dos t períodos e o investimento inicial necessário (FC_0), de acordo com a Equação 4 (Copeland, Weston e Shastri 2004). A avaliação dessas diferenças requer uma taxa de juros, conhecida como Taxa Mínima de Atratividade (TMA), fornecida pela empresa, que representa as expectativas de retorno dos investidores (Sambasivarao e Deshmukh 1997). Nesse sentido, um VPL maior que zero indica que a alternativa de investimento é viável porque excede as expectativas dos investidores (Copeland, Weston e Shastri 2004).

$$VPL = \sum_{t=1}^m \frac{FC_t}{(1+TMA)^t} + FC_0 \quad (\text{Equação 4})$$

O VPL fornece uma avaliação quantitativa com base no fluxo de caixa que deve estimar receitas (desejáveis) e despesas (indesejáveis) (Sambasivarao and Deshmukh 1997). Assim, as receitas consideradas no fluxo de caixa devem representar os efeitos proporcionados pela alternativa de investimento em sistemas de manufatura, como, por exemplo, produtividade, custo, qualidade, entrega e flexibilidade (Cheng *et al.*, 2018). Por outro lado, as despesas devem representar todos os custos relacionados à aquisição, implantação, operação e manutenção da solução tecnológica (Oesterreich e Teuteberg 2016). Por exemplo, o custo para treinamento de funcionários (Veile *et al.* 2019) e o custo de uso da nova tecnologia (Yeh e Chen 2018) são exemplos de custos de implementação e operação, respectivamente. Exige que as consequências (desejáveis e indesejáveis) sejam expressas em unidades monetárias. Conforme exposto na seção 4.3.2, neste estudo tais informações foram obtidas de iniciativas anteriores e PoCs desta e de outras unidades no exterior, bem como de cotações detalhadas de fornecedores de tecnologia.

Para a dimensão financeira, adotamos o método Payback para comparar os potenciais investimentos em tecnologias. Enquanto o VPL avalia a lucratividade, o payback é um método que calcula o retorno por ano desde o início do projeto até que o retorno acumulado seja igual ao custo do investimento (Lefley 1996). Essa análise fornece o tempo para recuperar o custo do investimento, considerando a TMA desejada pelos investidores (Copeland, Weston e Shastri 2004). O payback é equivalente ao número de t períodos necessários para tornar o VPL zero (Frank *et al.*, 2013). Desse modo, o payback é calculado usando $VPL = 0$ na Equação 4. O tempo necessário para atingir o payback é definido como o período de payback (PBP) (Lefley 1996).

4.3.3 Decisão

O estágio de Decisão é o último do processo de avaliação de investimentos em tecnologias I4.0. Nesse estágio, a empresa se engaja em atividades que levam à adoção ou rejeição da nova tecnologia (Rogers 2003). Desta forma, a decisão de adotar ou rejeitar a alternativa de investimento será pautada pelo desempenho nas perspectivas sociotécnica, econômica e financeira. No entanto, embora as três perspectivas sejam importantes, elas são diferentes. Assim, esta etapa propõe a criação de um índice que integre essas três perspectivas para avaliar alternativas de investimento

(Frank *et al.*, 2013). Para isso, os valores individuais das perspectivas avaliadas precisam ser padronizados na mesma escala que permite determinar um índice integrativo do investimento que norteará a decisão de adoção ou rejeição do potencial investimento em tecnologia.

4.3.3.1 Padronização dos índices de desempenho

Esta etapa visa ajustar os indicadores de desempenho do potencial investimento em tecnologia, STS_i , VPL_i e $Payback_i$, em uma escala padronizada. O índice STS_i , obtido da Equação 3, representa a razão entre as consequências desejáveis e indesejáveis da alternativa de investimento, julgadas com base nos critérios sociotécnicos. Nesse sentido, o STS_i deve ser ajustado a uma escala com intervalo de 0 a 1 para ser utilizado como entrada para o cálculo do índice integrativo. Esse ajuste pode ser realizado desenvolvendo uma curva S limitada pelos níveis superior e inferior (Frank *et al.*, 2013), de acordo com a Equação 5. Onde r_{STS_i} é o resultado do STS para o projeto de investimento i transformado em uma escala de 0 a 1. O parâmetro L_{STS} representa o valor máximo para o STS_i , definido pelos especialistas da empresa.

$$R_{STS_i} = 1 - e^{-\left(\frac{L_{STS} + STS_i}{\theta_{STS}}\right)^{\gamma_{STS}}} \quad (\text{Equação 5})$$

Os parâmetros γ_{STS} e θ_{STS} determinam a forma e a amplitude da curva S, representada pela Equação 6 e 7, respectivamente. Os valores de STS_{max} , a projeção superior para o STS, e STS_{min} , a projeção inferior para o STS, são definidos com base na opinião dos especialistas envolvidos na avaliação sociotécnica.

$$\Gamma_{STS} = \frac{\ln\left(\frac{\ln(1-0.9)}{\ln(1-0.1)}\right)}{\ln\left(\frac{L_{STS} + STS_{max}}{L_{STS} + STS_{min}}\right)} \quad (\text{Equação 6})$$

$$\theta_{STS} = \frac{L_{STS} + STS_{max}}{(-\ln(1-0.9))^{1/\gamma_{STS}}} \quad (\text{Equação 7})$$

Por outro lado, o resultado do VPL_i representa a perspectiva econômica, expressando a rentabilidade da alternativa de investimento em termos monetários. Assim, é necessário transformar esse resultado em uma escala com intervalo de 0 a 1, para que possa ser utilizado como entrada no cálculo do índice integrativo. Essa transformação também foi definida pela curva S

(Frank *et al.*, 2013), conforme a Equação 8. Onde r_{ECO_i} é o resultado do VPL para o potencial investimento em tecnologia i transformado em uma escala de 0 a 1.

$$r_{ECO_i} = 1 - e^{-\left(\frac{L_{VPL} + VPL_i}{\theta_{VPL}}\right)^{\gamma_{VPL}}} \quad (\text{Equação 8})$$

O parâmetro L_{VPL} representa o valor monetário máximo para o VPL, definido pelos especialistas da empresa. As variáveis γ_{VPL} e θ_{VPL} são parâmetros da curva S, determinados pelas Equações 9 e 10, respectivamente. O valor de VPL_{max} , a projeção superior para o VPL, e VPL_{min} , a projeção inferior para o VPL, são definidos com base na opinião dos especialistas envolvidos na avaliação econômica.

$$\gamma_{VPL} = \frac{\ln\left(\frac{\ln(1-0.9)}{\ln(1-0.1)}\right)}{\ln\left(\frac{L_{VPL} + VPL_{max}}{L_{VPL} + VPL_{min}}\right)} \quad (\text{Equação 9})$$

$$\theta_{VPL} = \frac{L_{VPL} + VPL_{max}}{(-\ln(1-0.9))^{1/\gamma_{VPL}}} \quad (\text{Equação 10})$$

Por fim, o resultado do $Payback_i$ representa a perspectiva financeira, expressando o tempo necessário para recuperar o custo do investimento, geralmente em anos. Assim, é necessário transformar o payback em uma escala com intervalo de 0 a 1, para que possa ser utilizado no cálculo do índice integrativo, conforme a Equação 11. Onde r_{FIN_i} é o valor do payback do potencial investimento em tecnologia i normalizado.

$$r_{FIN_i} = e^{-\left(\frac{L_{Pay} + Payback_i}{\theta_{Pay}}\right)^{\gamma_{Pay}}} \quad (\text{Equação 11})$$

O parâmetro L_{Pay} é igual a 0, pois o melhor payback é o retorno imediato do capital investido (Frank *et al.*, 2013). Os parâmetros γ_{Pay} e θ_{Pay} são determinados pela Equação 12 e 13, respectivamente. Enquanto $Payback_{max}$ representa o pior cenário, $Payback_{min}$ representa o melhor cenário, ou seja, o menor tempo para recuperar o capital investido.

$$\gamma_{Pay} = \frac{\ln\left(\frac{\ln(0.1)}{\ln(0.9)}\right)}{\ln\left(\frac{Payback_{max}}{Payback_{min}}\right)} \quad (\text{Equação 12})$$

$$\theta_{\text{Pay}} = \frac{\text{Payback}_{\min}}{(-\ln(0.9))^{1/\gamma_{\text{Pay}}}} \quad (\text{Equação 13})$$

A transformação dos indicadores que representam as três perspectivas permite à empresa avançar para a fase em que esses indicadores são integrados em um índice geral de apoio ao processo de tomada de decisão de investimento, desenvolvido a seguir.

4.3.3.2 Índice integrativo do investimento

Após padronizar as escalas dos indicadores, esta etapa envolve a determinação de um índice geral. Para isso adotamos a função de agregação denominada como *ordered weighted aggregation* (OWA). A OWA é uma técnica de agregação útil e amplamente usada para agregação multicritério que determina o processo de tomada de decisão (Jin, Mesiar e Yager 2019). Nesse sentido, para agregar os três indicadores, foi adaptado o método proposto por Merigó e Casanovas (2011), denominado *induced Euclidean ordered weighted averaging distance* (IEOWAD). Este método é uma extensão do OWA, que usa variáveis indutoras para atribuir pesos diferentes aos critérios na construção do índice geral. O IEOWAD permite que a tomada de decisão considere processos de reordenamento mais complexos que possam descrever o problema de decisão de forma completa (Merigó e Casanovas 2011). A Equação 14 foi usada para determinar o índice geral tridimensional, denominado índice integrativo do investimento (III_i). Onde III_i representa o índice integrativo do investimento para o potencial investimento em tecnologia *i*.

$$\text{III}_i = \sqrt{3 * (w_{\text{STS}} * r_{\text{STS}_i}^2 + w_{\text{ECO}} * r_{\text{ECO}_i}^2 + w_{\text{FIN}} * r_{\text{FIN}_i}^2)} \quad (\text{Equação 14})$$

Os parâmetros r_{STS_i} , r_{ECO_i} e r_{FIN_i} representam o valor normalizado das perspectivas sociotécnica, econômica e financeira, respectivamente. Os parâmetros w_{STS} , w_{ECO} e w_{FIN} representam o peso de r_{STS_i} , r_{ECO_i} e r_{FIN_i} , respectivamente, para determinar o índice integrativo. Esses pesos recebem valores de 0 a 1, onde a soma desses pesos deve ser igual a 1.

O índice III_i expressa o desempenho esperado do potencial investimento em tecnologia, combinando simultaneamente as três perspectivas em análise. Além da análise multicritério, o índice III_i fornece orientação simplificada e objetiva para apoiar a tomada de decisão na seleção de quais potenciais investimentos em tecnologia a empresa deve fazer primeiro. Além disso, a

principal vantagem da adoção de medidas de distância (OWA) na tomada de decisão é comparar o potencial investimento em tecnologia com um resultado ideal (Merigó e Casanovas 2011), que representa o resultado exigido pela empresa. Assim, o melhor desempenho não significa que o potencial investimento em tecnologia apresenta o melhor resultado em todas as perspectivas, mas sim o melhor equilíbrio entre as três perspectivas avaliadas (Frank *et al.*, 2013).

4.4 Demonstração da aplicação do framework

O framework proposto foi aplicado em uma empresa para demonstrar seu uso na prática, permitindo também testá-lo e validá-lo em um caso real. A investigação de casos específicos é uma abordagem altamente consolidada na literatura de gestão de operações para analisar e avaliar a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 (ver Davies *et al.* 2020; Strandhagen *et al.* 2020; Agrifoglio *et al.* 2017). A demonstração está dividida em duas partes. Primeiramente, são descritos os procedimentos metodológicos para selecionar o caso e coletar os dados. Em segundo lugar, são descritos os resultados da aplicação.

4.4.1 Procedimentos metodológicos para o estudo de caso

4.4.1.1 Seleção do estudo de caso

A seleção do estudo de caso foi baseada em amostragem teórica considerando critérios específicos (Voss, Tsiriktsis e Frohlich 2002). Em primeiro lugar, a empresa já deve ter executado projetos de investimento envolvendo a adoção de tecnologias. Em segundo lugar, a empresa deve ter um processo formal de avaliação de investimentos, considerando, pelo menos, os aspectos econômicos e financeiros tradicionais. Terceiro, a empresa deve ter uma estratégia definida para sua jornada de transformação digital (Lu e Weng, 2018).

Seguindo os critérios mencionados, este estudo selecionou uma empresa multinacional fabricante de máquinas e equipamentos para a indústria agrícola, doravante denominada AGRI. Globalmente, a AGRI é uma das empresas de manufatura mais importantes em seu setor. A AGRI possui mais de 50 fábricas em todo o mundo, e a maioria delas está executando iniciativas I4.0. Os resultados dessas iniciativas e provas de conceito (PoCs) são compartilhados entre todas as fábricas por meio de um fórum interno de manufatura avançada formado por especialistas

representantes de cada unidade. No Brasil, as unidades fabris da AGRI são conhecidas como algumas das mais maduras na implantação da Indústria 4.0 em todo o país. Muitos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 já foram testados como prova de conceito ou implementados nas fábricas brasileiras, incluindo manutenção preditiva inteligente, logística inteligente, ferramentas e equipamentos inteligentes conectados, integração vertical, veículos guiados autônomos, manufatura aditiva, exoesqueletos, óculos inteligentes, robôs colaborativos, realidade aumentada, entre outros. Esta empresa tem uma estratégia formal para a Indústria 4.0, com objetivos I4.0 claros definidos até 2023. Particularmente, a unidade industrial onde o estudo de caso foi realizado é atualmente considerada estar no quarto estágio do índice de maturidade da Acatech (Schuh *et al.* 2020), ou seja, transparência. Com algumas iniciativas envolvendo análise preditiva já em execução, a empresa ainda está no processo de entender todo o potencial dos dados coletados na operação para poder usá-los na análise de causa raiz. De acordo com sua estratégia de Indústria 4.0, a AGRI planeja atingir o último estágio do índice de maturidade (adaptabilidade) da Acatech nesta unidade industrial até 2023.

No primeiro contato com os especialistas da AGRI, eles relataram dificuldades para justificar o investimento em tecnologias I4.0 utilizando o processo tradicional de avaliação de investimentos corporativos, baseado apenas em critérios econômico-financeiros. Assim, a AGRI demonstrou um grande interesse em ser objeto deste estudo e fornecer todos os dados necessários, o que tornou as interações entre pesquisadores e especialistas produtivas ao longo das etapas de teste e validação do framework. O framework foi utilizado para avaliar dez projetos de investimento em tecnologias I4.0 propostos pela AGRI (Tabela 2).

4.4.1.2 Coleta de dados

Usamos diferentes fontes de informação para aumentar a confiabilidade de nossa análise (Yin 2009). Usamos uma abordagem de triangulação de dados que combina diferentes fontes de dados para entender a aplicação do framework (Voss, Tsikriktsis e Frohlich 2002; Yin 2009). As primeiras fontes foram entrevistas com especialistas da AGRI. Para aumentar a confiabilidade dos dados, cinco especialistas da AGRI participaram ativamente dos testes do framework. Três deles são da área de manufatura avançada, responsáveis pela implementação de tecnologias no chão de fábrica. O quarto especialista é um gerente de TI responsável pela integração de novas operações e tecnologias de informação com os atuais sistemas de TI. O quinto especialista é um gerente de engenharia responsável por projetar e lançar novos produtos na linha de produção (detalhes sobre

os especialistas são fornecidos no Apêndice C). Além desses especialistas que interagiram diretamente com os pesquisadores, outras áreas foram consultadas pelos especialistas durante os testes do framework para informações complementares, incluindo suprimentos, financeiro e produção, bem como fornecedores de tecnologia e especialistas de outras fábricas ao redor do mundo. As discussões e análises dos investimentos foram realizadas em três sessões de grupos focais com os especialistas. Três a quatro horas foram gastas em cada sessão. As sessões aconteceram em três semanas diferentes para dar tempo aos especialistas coletarem as informações necessárias, que às vezes precisavam ser solicitadas a outras unidades. Além disso, uma reunião final serviu para apresentar aos especialistas os resultados da avaliação de investimentos. Durante a aplicação do framework, os especialistas também coletaram insumos do conselho de administração, principalmente no que diz respeito às decisões estratégicas que devem ser consideradas.

Tabela 2: Potenciais investimentos em tecnologias

Nome do projeto	Tecnologia	Objetivo
(P1) Smart AGVs – MIR	Autonomous vehicles, Smart sensors, RFID	Este projeto propõe a utilização de AGVs inteligentes para entrega de kits de peças às linhas de montagem.
(P2) Industrial Cloud	Cloud, Industrial cloud, Big Data Analytics, Cybersecurity	Este projeto está relacionado à primeira onda do Projeto Nuvem Industrial e cobre a coleta de dados e a criação de painéis para gestão de ativos.
(P3) Implementação de Exoskeletons	Wearables	Este projeto visa implementar a tecnologia de exoesqueleto para entender seus resultados e benefícios em relação à ergonomia e eficiência.
(P4) Smart Devices Project – Google Glass	Augmented reality (AR)	Este projeto visa implementar a tecnologia Google Glass nos processos de inspeções da qualidade e coleta de dados.
(P5) RPA Project	Robotics Process Automation (RPA)	Este projeto visa aplicar RPA para reduzir a carga de trabalho manual e melhorar a precisão e os controles nos processos administrativos.
(P6) Automated welding process	Actuators, Smart sensors, Robotics, Standards and Protocols	Este projeto visa automatizar o processo de soldagem para reduzir custos e aumentar a capacidade.
(P7) Machining Center – Integração	Actuators, Smart sensors, Flexible Manufacturing Systems (FMS), Machine to Machine, Standards and Protocols, Human-Machine Interface	Este projeto tem como objetivo implantar uma nova célula flexível para aumentar a capacidade, além de permitir customização em massa e modularização na linha de produção.
(P8) Machining Center – Migração	Actuators, Smart Sensors, Human-Machine Interface, Machine to Machine, Standards and Protocols	Este projeto visa integrar máquina com outras máquinas em uma linha de usinagem existente para garantir interoperabilidade e transparência entre os processos.
(P9) Team Center – PLM solution	Simulation, Computer-aided design (CAD), Computer-aided engineering (CAE), ERP, Big Data, Cloud, Cybersecurity	Este projeto visa a implementação de uma solução integrada para gestão da informação (dados, processos, sistemas e pessoas) ao longo de todo o ciclo de vida do produto (solução PLM).
(P10) Intelligent manufacturing processes – MES solution	Manufacturing execution system (MES), ERP, Cloud, Big Data Analytics, IoT, Cybersecurity, Smart sensors	Este projeto visa implementar uma solução integrada baseada em MES para promover a inteligência no processo de tomada de decisão da manufatura.

Todas as entrevistas e grupos focais foram gravados com um gravador de áudio, enquanto os pesquisadores anotavam suas impressões e comentários dos participantes. As anotações foram feitas por dois pesquisadores autores deste artigo e por um assistente de pesquisa. Essa abordagem foi seguida por um confronto das impressões de cada pesquisador sobre a entrevista, levando a uma visão melhor e mais ampla do caso, reduzindo o viés dos observadores (Yin 2009).

Adicionalmente, analisamos documentos de investimentos anteriores, como planilhas eletrônicas com custos e retornos, textos com justificativas qualitativas dos investimentos, fichas técnicas e cotações de fornecedores. Também analisamos relatórios de iniciativas passadas e provas de conceito (PoCs) de tecnologias I4.0 desta unidade e de outras unidades no exterior. Os resultados dessas iniciativas anteriores foram essenciais para nossas análises econômico-financeiras. Além disso, foram estudados documentos internos com a estratégia I4.0 da AGRI. Todo o processo de coleta de dados foi realizado no período de novembro de 2019 a fevereiro de 2020.

4.4.1.3 Análise de dados

Como primeiro passo para a análise dos dados, as entrevistas individuais gravadas foram literalmente transcritas por um assistente de pesquisa para facilitar a análise. Para os grupos focais, os pesquisadores ouviram várias vezes as gravações para aprimorar as anotações feitas durante os eventos. Em seguida, os pesquisadores analisaram os dados coletados individualmente dos especialistas e grupos focais para extrair os principais insights do feedback dos participantes. Várias reuniões foram realizadas entre os três pesquisadores para consolidar os resultados das entrevistas e documentos analisados. Documentos ou informações adicionais foram solicitados aos especialistas da AGRI quando necessário. Além disso, como o processo de aplicação e teste do framework foi gradativo, foi possível esclarecer eventuais dúvidas ou divergências entre os pesquisadores entre um encontro e outro. Os resultados finais do framework foram apresentados ao diretor global de gestão de operações da AGRI e ao conselho de administração da divisão brasileira da AGRI, onde o framework foi aplicado.

4.4.2 Aplicação do framework

A aplicação do framework na AGRI é descrita seguindo cada uma das etapas propostas a partir do processo de decisão da inovação.

4.4.2.1 Estágio do conhecimento

Na primeira etapa, os especialistas da AGRI selecionaram dez potenciais investimentos em tecnologia (Tabela 2) para testar nosso framework. O principal critério de seleção foi que o projeto envolvesse a implementação de uma tecnologia da Indústria 4.0. Como parte da primeira etapa, ou seja, análise dos objetivos estratégicos, solicitamos aos especialistas que explicassem a estratégia da AGRI rumo à Indústria 4.0. A unidade de negócio analisada tem objetivos claros sobre o que chamam de *smart factory roadmap*, compreendendo as seguintes etapas, uma para cada ano: (2019) Visibilidade, com o objetivo de coletar informações do estado atual em tempo real; (2020) Monitoramento, com o objetivo de monitorar e analisar os dados coletados; (2021) Controle, com o objetivo de controlar os processos com base em dados; (2022) Otimização, com o objetivo de implementar mudanças baseadas em dados e melhorar processos revisando os padrões; e (2023) Autonomia, com o objetivo de ter processos que monitorem, controlem e se otimizem de forma autônoma.

Com essa estratégia em mãos, os cinco especialistas analisaram e discutiram os dez potenciais investimentos em tecnologia. Os especialistas chegaram a um consenso sobre nove potenciais investimentos em tecnologia alinhados ao roadmap da fábrica inteligente da AGRI. No entanto, uma discussão mais profunda foi necessária para o projeto Exoesqueleto (P3). Embora seja uma tecnologia de ponta, não estava claro como ajudaria a atingir os objetivos declarados da Indústria 4.0. Após alguma discussão, os especialistas da AGRI decidiram manter o projeto porque ajudaria não só a produtividade, mas também as condições de trabalho dos funcionários, objetivo que também é perseguido pela empresa com a implementação da Indústria 4.0. Assim, os dez potenciais investimentos em tecnologia passaram da etapa 1.

A segunda etapa analisou as condições prévias exigidas para a adoção adequada de cada investimento. Primeiro, os especialistas coletaram informações técnicas das tecnologias. As informações vieram de duas fontes principais: (i) fornecedores de tecnologia e (ii) PoCs anteriores executadas por unidades em todo o mundo. Com esse entendimento, os especialistas julgaram as

condições prévias da AGRI para apoiar a adoção das novas tecnologias. Essa análise levou à rejeição de um dos potenciais investimentos em tecnologia: P10. Embora importante para a estratégia da empresa, esta solução exigia uma infraestrutura avançada prévia para compartilhar e armazenar dados na nuvem, ainda indisponível na AGRI. Em alguns casos, a análise das condições prévias revelou também a necessidade de ampliar o escopo do potencial investimento em tecnologia para cobrir todos os requisitos da solução tecnológica ainda não disponíveis na AGRI.

Uma vez definidos os potenciais investimentos em tecnologia, as informações que descrevem cada um deles foram organizadas em uma planilha eletrônica. Além da descrição técnica, foi adicionado um campo para justificar e destacar o alinhamento do potencial investimento em tecnologia com a estratégia I4.0 da AGRI para apresentar a análise das condições prévias e quaisquer ações ou diretrizes necessárias para cumpri-las. Por fim, outros campos foram acrescentados para apresentar a avaliação dos aspectos sociotécnicos, econômicos e financeiros a serem discutidos nas próximas subseções.

4.4.2.2 Estágio da persuasão

Esta seção apresenta os resultados obtidos pela análise dos potenciais investimentos em tecnologias em relação aos indicadores VPL, Payback e Impacto Sociotécnico (STS_i). Os indicadores VPL e Payback são usados há muito tempo pela AGRI. No entanto, apesar de apontados como relevantes pelos especialistas, os aspectos sociotécnicos nunca foram tratados formalmente.

A avaliação da perspectiva sociotécnica requer inicialmente o estabelecimento de alguns parâmetros. Primeiramente, os critérios definidos foram validados com os especialistas, o que levou à lista final na Tabela 1. A segunda etapa envolveu a determinação dos pesos de cada dimensão sociotécnica (Y_j), além dos pesos dos critérios dentro de cada dimensão (ws_i). A Tabela 3 apresenta esses pesos, obtidos a partir de comparações pareadas realizadas por especialistas da AGRI, seguindo o Analytic Hierarchy Process (AHP) proposto por Saaty (2004). Na etapa seguinte, os especialistas da AGRI avaliaram as alternativas de investimento em termos das consequências desejáveis (DC_i) e indesejáveis (UC_i), utilizando uma escala de 1 a 5 para cada um dos critérios. A soma do produto dos pesos (Y_j) e (ws_i) com a respectiva nota das consequências desejadas (DC_i) resultou nas consequências desejáveis totais (DC'). Da mesma forma, a soma do produto dos pesos (Y_j) e (ws_i) com a respectiva nota de consequências indesejáveis (UC_i) resultou

nas consequências indesejáveis totais (UC'). A Tabela 3 mostra os resultados obtidos para cada potencial investimento em tecnologia, e o Apêndice D mostra a planilha usada para avaliar os critérios sociotécnicos. Por fim, os resultados para a razão (Equação 3) entre o total de consequências desejáveis e indesejáveis (STS_i) são apresentados na Tabela 4.

Tabela 3: Avaliação Sociotécnica

Critério	Y_j	ws_i	DC_1		UC_1		DC_2		UC_2		DC_3		UC_3		DC_4		UC_4		DC_5		UC_5		DC_6		UC_6		DC_7		UC_7		DC_8		UC_8		DC_9		UC_9			
T1	0.21	0.44	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	5	1	5	1	4	1	4	1	4	1	4	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1		
T2	0.21	0.25	1	2	1	2	1	2	1	2	4	1	4	1	4	1	1	3	1	3	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3
T3	0.21	0.31	3	1	4	1	3	1	5	3	4	1	1	2	2	1	2	1	3	1	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3
O1	0.32	0.40	3	1	4	1	2	2	4	1	2	2	4	1	2	2	1	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2
O2	0.32	0.23	4	1	4	3	2	1	4	1	5	1	4	1	5	1	4	1	3	1	1	1	4	3	1	1	4	3	1	1	4	3	1	1	4	3	1	1	4	3
O3	0.32	0.37	4	2	4	2	5	1	3	3	4	1	4	2	2	2	3	1	4	2	2	2	3	1	4	2	2	2	3	1	4	2	2	2	3	1	4	2	2	2
E1	0.25	0.29	3	1	1	1	1	1	3	1	4	1	4	1	4	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1
E2	0.25	0.48	1	2	1	1	5	1	1	3	1	1	1	3	1	1	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
E3	0.25	0.23	1	1	2	3	3	1	5	1	5	3	4	2	5	4	4	3	2	2	4	3	2	2	4	3	2	2	4	3	2	2	4	3	2	2	4	3	2	2
S1	0.22	0.53	3	1	4	1	5	1	1	3	4	3	5	1	2	1	3	1	4	1	3	1	4	1	3	1	4	1	3	1	4	1	3	1	4	1	3	1	4	1
S2	0.22	0.27	1	3	5	1	1	2	4	1	1	1	1	3	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1
S3	0.22	0.20	1	2	4	2	2	1	4	1	1	3	1	1	1	3	1	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1
			DC'_1	UC'_1	DC'_2	UC'_2	DC'_3	UC'_3	DC'_4	UC'_4	DC'_5	UC'_5	DC'_6	UC'_6	DC'_7	UC'_7	DC'_8	UC'_8	DC'_9	UC'_9																				
			2.62	1.45	3.21	1.48	3.19	1.24	3.22	1.84	3.30	1.56	3.19	1.70	2.67	1.52	2.31	1.24	3.53	1.73																				

O valor do VPL avaliou a perspectiva econômica. Os valores do VPL foram divididos pelo valor total do investimento para lidar com as diferenças das quantidades monetárias dos potenciais investimentos em tecnologia. Esse índice é conhecido como índice de lucratividade, que mede a proporção entre o VPL e o investimento total (Copeland, Weston e Shastri 2004). Por fim, a perspectiva financeira foi avaliada com base no payback.

Os resultados da Tabela 4 mostram que a alternativa P3 apresenta o melhor desempenho para o indicador sociotécnico, $STS_3 = 2,6$. Isso significa que se espera que o investimento P3 forneça consequências desejáveis a uma taxa de 2,6 vezes as consequências indesejáveis quando considerados os critérios sociotécnicos. Por outro lado, o investimento P8 apresenta o melhor resultado para o indicador econômico, $VPL_8 = 68,2\%$. Isso indica que o VPL do investimento P8 corresponde a 68,2% do valor total do investimento. Da mesma forma, o investimento P8 também apresenta o melhor desempenho para o indicador financeiro, $Payback_8 = 2,1$ anos. Assim, é possível observar diferentes resultados comparando critérios sociotécnicos com critérios econômicos e financeiros.

Tabela 4: Resultados de STS_i , VPL_i e $Payback_i$

Projeto	STS_i	VPL_i ($VPL/Inv.$)	$Payback_i$
P1	1.80	12.21%	3.13
P2	2.17	8.89%	4.60
P3	2.57	7.00%	4.30
P4	1.75	8.89%	3.90
P5	2.11	11.35%	3.80
P6	1.87	46.89%	2.50
P7	1.75	-2.24%	3.67
P8	1.86	68.18%	2.10
P9	2.04	-4.78%	4.50

4.4.2.3 Estágio da decisão

Esta etapa visa apoiar a escolha entre adotar ou rejeitar determinado investimento em tecnologia por meio do índice integrativo do investimento (III_i).

4.4.2.3.1 Padronização dos índices de desempenho

Os indicadores a serem integrados foram padronizados em uma escala que varia de 0 a 1 usando curvas de preferência, conhecida como curva S (Frank *et al.* 2016; Frank *et al.* 2013). Primeiro, os níveis superior e inferior que definem a curva S foram definidos. Os investimentos da AGRI com $Payback \leq 2,5$ anos são considerados aceitáveis. Enquanto os valores de retorno $> 2,5$ anos, o investimento é restringido. Portanto, o nível de alto desempenho para Payback foi $Payback_{min} = 2,5$ anos (pontuação 0,9), enquanto o nível de baixo desempenho foi adotado $Payback_{max} = 6$ anos (pontuação 0,1).

O parâmetro L foi definido para a condição ideal que poderia ser alcançada em cada indicador (por exemplo, para o payback, foi adotado $L_{Pay} = 0$, representando o retorno imediato do investimento). A Tabela 5 apresenta os parâmetros adotados para cada indicador pelos especialistas da empresa, e os valores dos parâmetros γ e θ de cada curva S (de acordo com as Equações 5 a 13).

Tabela 5: Parâmetros da curva S

	Sociotécnico		Econômico		Financeiro	
Nível de alto desempenho (escore 0.9)	STS_{max}	3.00	VPL_{max}	70.0%	$Payback_{min}$	2.50
Nível de baixo desempenho (escore 0.1)	STS_{min}	0.30	VPL_{min}	-15.0%	$Payback_{max}$	6.00
Parâmetro L	L_{STS}	5.00	L_{VPL}	90.0%	L_{Pay}	0.00
Parâmetro γ	γ_{STS}	7.49	Γ_{VPL}	4.07	γ_{Pay}	3.52
Parâmetro θ	θ_{STS}	7.16	Θ_{VPL}	1.30	θ_{Pay}	4.74

A Figura 2 mostra a curva S resultante para cada dimensão de avaliação em análise. A partir dessas curvas, foram obtidos os seguintes escores padronizados: sociotécnico (r_{STS}), econômico (r_{ECO}) e financeiro (r_{FIN}).

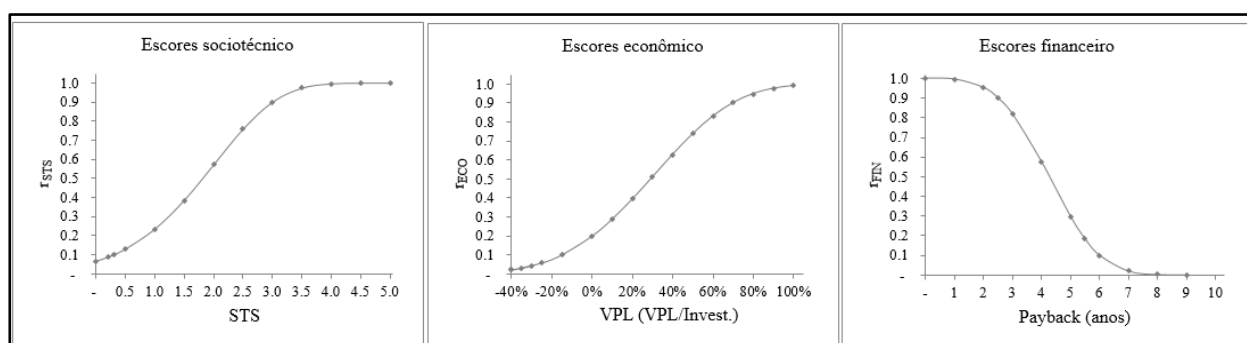


Figura 2: Escores sociotécnico, econômico e financeiro

4.4.2.3.2 Índice integrativo do investimento

Essa etapa exigiu inicialmente a definição dos pesos para cada dimensão: sociotécnica (w_{STS}), econômica (w_{ECO}) e financeira (w_{FIN}), para a composição do índice integrativo do investimento IIIi, conforme a equação 14. Porém, durante as discussões com os especialistas, foram definidas três categorias de investimento: (i) *Investimentos estratégicos ou estruturantes* (SSI), ou seja, investimentos que visam atender demandas estratégicas, ou que viabilizam a execução de futuros projetos I4.0; (ii) *Investimentos criadores de valor* (VCI), ou seja, investimentos que promovem, por exemplo, otimização, previsibilidade e adaptabilidade das operações, e com benefícios perceptíveis e quantificáveis; e (iii) *Investimentos laterais* (SI), que não estão diretamente alinhados com os principais objetivos em relação a estratégia I4.0 da empresa, mas tem o potencial de gerar ganhos econômicos imediatos para a organização.

A Figura 3 apresenta as três categorias de investimentos e os respectivos pesos (w_{STS} , w_{ECO} , w_{FIN}) definidos pelos especialistas da AGRI por meio de comparações pareadas, seguindo

o método AHP descrito na Seção 4.3.2.1 (Saaty 2004). Conforme mostrado na Figura 4, em *investimentos estratégicos ou estruturantes*, o peso da perspectiva sociotécnica é maior porque o retorno na perspectiva econômica e financeira ainda não é claro. Ainda assim, esses investimentos são essenciais para construir as bases de uma jornada I4.0 consistente. Um exemplo desse tipo de projeto é o investimento da AGRI na tecnologia de nuvem industrial para coletar dados de todos os equipamentos da fábrica. A categoria de *investimentos laterais* tem pesos mais altos nas perspectivas econômicas e financeiras para justificar a execução de projetos que não fazem parte da estratégia central I4.0 da empresa. Por exemplo, durante o desenvolvimento do projeto RPA (P5), um fornecedor demonstrou à AGRI que automatizar o processo de soldagem (P6) reduziria a necessidade de um segundo turno no setor. Este projeto não foi planejado originalmente, mas foi executado devido à economia e retorno imediato fornecido pelo investimento.

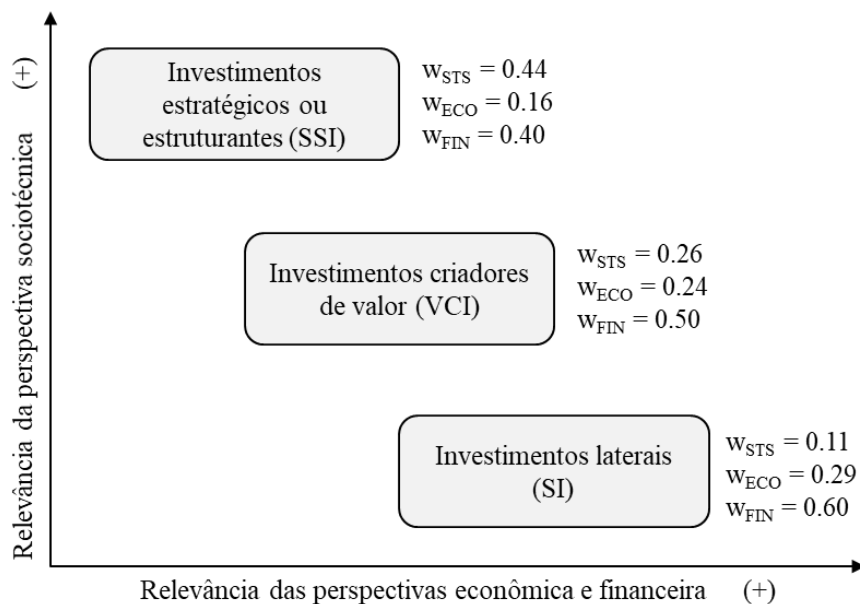


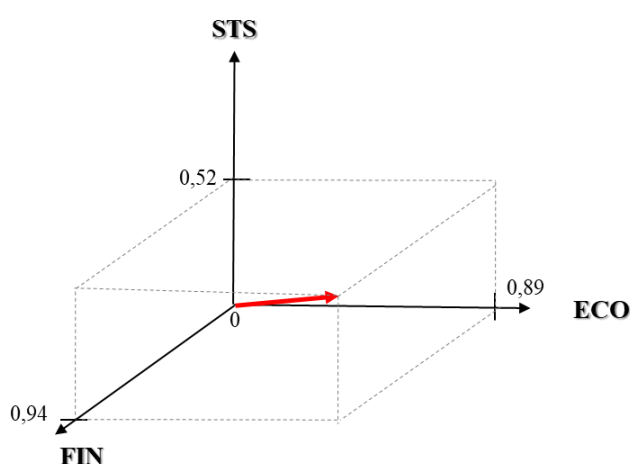
Figura 3: Categorias de investimentos e pesos

Finalmente, foi possível determinar III_i . A Tabela 6 apresenta os resultados de III_i e o ranking de priorização dos investimentos proposto pelo índice.

Para ilustrar a composição do índice III , a Figura 4 apresenta uma representação gráfica do índice para o investimento em tecnologia P8. Este investimento apresentou as melhores pontuações para as perspectivas econômica e financeira, combinadas com valores médios para a perspectiva sociotécnica.

Tabela 6: Ranking dos potenciais investimentos em tecnologias

Projeto	Categoria	w_{STS}	w_{ECO}	w_{FIN}	STS	ECO	FIN	III	Model Rank	AGRI rank
					I_{STS}	I_{ECO}	I_{FIN}			
(P8) Machining Center - Migration	VCI	0.26	0.24	0.50	0.52	0.89	0.94	1.46	1°	1°
(P6) Automated welding process	SI	0.11	0.29	0.60	0.52	0.70	0.90	1.41	2°	2°
(P1) Smart AGVs - MIR	VCI	0.26	0.24	0.50	0.50	0.31	0.79	1.10	3°	3°
(P3) Exoskeletons implementation	SSI	0.44	0.16	0.40	0.78	0.26	0.49	1.06	4°	7°
(P5) Robotics Process Automation	VCI	0.26	0.24	0.50	0.61	0.30	0.63	0.98	5°	5°
(P7) Machining Center - Integration	VCI	0.26	0.24	0.50	0.48	0.18	0.67	0.93	6°	4°
(P2) Industrial Cloud	SSI	0.44	0.16	0.40	0.64	0.28	0.41	0.88	7°	9°
(P4) Smart Devices - Google Glass	SSI	0.44	0.16	0.40	0.47	0.28	0.60	0.88	8°	6°
(P9) Team Center - PLM solution	SSI	0.44	0.16	0.40	0.59	0.16	0.43	0.83	9°	8°

**Figura 4:** Escores do investimento em tecnologia P8

Ao examinar a Tabela 6, é possível observar que os potenciais investimentos classificados nas três primeiras posições são projetos classificados nas categorias Investimento criadores de valor (VCI) e Investimentos laterais (SI), em que os índices das perspectivas econômica e financeira foram elevados. Por outro lado, o 4° investimento em tecnologia, P3, apresenta baixo índice para as perspectivas econômica e financeira, mas apresenta a melhor pontuação para a perspectiva sociotécnica e foi classificado como um investimento estratégico ou estruturante (SSI). Assim, podemos observar o impacto da adequada incorporação dos aspectos sociotécnicos na análise de investimentos, conforme proposto pelo nosso framework. Por exemplo, considerando apenas os aspectos financeiros e econômicos, o projeto P3 ficaria apenas na 7ª posição e P2, agora classificado na 7ª, ficaria apenas na última posição. Os especialistas da AGRI foram unânimes em concordar que a classificação considerando as três perspectivas reflete muito mais as necessidades estratégicas da empresa e que a estrutura proposta evita avaliações ambíguas de fatores qualitativos. Isso também foi validado pelo diretor global de gestão de operações e pelo conselho

de administração da divisão brasileira da AGRI, a quem o framework e os resultados foram apresentados para validação.

Por fim, os especialistas definiram o ponto de decisão de corte, ou seja, o valor mínimo do índice integrativo do investimento (III_i), para aceitar um investimento. Com base em uma reanálise de dez projetos rejeitados pela empresa no passado, e uma discussão sobre o pior cenário que seria aceitável pela empresa para cada perspectiva (ou seja, financeira, econômica e sociotécnica), os especialistas chegaram aos seguintes valores: para projetos SSI, III $\geq 0,81$; para projetos VCI, III $\geq 0,76$; e para projetos SI, III $\geq 0,70$. Assim, todas as alternativas de investimento na Tabela 6 foram consideradas como projetos viáveis.

Por fim, a Tabela 6 também apresenta o ranking resultante da abordagem AGRI tradicional, baseada no Payback. Os três primeiros projetos permaneceram os mesmos, pois são projetos com altos índices para as dimensões econômico-financeira, priorizados principalmente pela AGRI na escolha entre os projetos. Além disso, os resultados mostraram que esses projetos estão nas categorias VCI e SI, nas quais ambas as dimensões têm representatividade significativa para o AGRI, principalmente a financeira. As principais mudanças são observadas nos projetos P3 e P2. Embora esses projetos tenham pontuações baixas nas dimensões financeira e econômica, suas boas pontuações na dimensão sociotécnica os tornam investimentos mais atraentes do que outros projetos com pontuações econômico-financeiras mais altas. Portanto, tais resultados permitem comparar entre a abordagem anterior empregada pela empresa, que se baseava apenas nos critérios financeiros apresentados na Tabela 4, e a nova em que também foram integrados critérios econômicos e sociotécnicos, demonstrando uma sensibilidade do ranking mudar prioridades e justificar melhores aspectos qualitativos dos investimentos. Nesse sentido, os especialistas usaram esses outputs para discutir esses investimentos com a diretoria e escolher não apenas aqueles com alto retorno, mas também aqueles que contribuem com fatores subjetivos da fábrica. A estrutura forneceu a eles uma base objetiva para justificar as contribuições qualitativas dos investimentos em tecnologias I4.0.

4.5 Discussões e conclusões

Os investimentos em I4.0 criam desafios que vão além dos aspectos técnicos e quantitativos (Bosman, Hartman e Sutherland 2019). Aspectos qualitativos subjetivos em torno da adoção de tecnologias I4.0 tornam as decisões de investimento complexas, exigindo métodos de

tomada de decisão eficientes (Tabim *et al.*, 2021; Bai *et al.* 2020; Dreyer *et al.* 2020; Bai and Sarkis 2017). Nós fornecemos um passo a passo claro do processo de tomada de decisão de investimentos que pode orientar os profissionais na determinação do retorno sobre o investimento em tecnologias no contexto I4.0. Também fornecemos uma lista de critérios que devem ser avaliados e fornecemos diretrizes e exemplos de como os profissionais podem priorizar alternativas, justificar investimentos e selecionar as melhores opções.

A aplicação do framework proposto em um estudo empírico forneceu descobertas importantes. Em primeiro lugar, nós confirmamos a relevância de incorporar a perspectiva sociotécnica no processo de tomada de decisão. Essa perspectiva pode ser considerada um motivador para a implementação de tecnologias I4.0, pois inclui elementos que muitas vezes são negligenciados pelas abordagens tradicionais. A decisão de investir em tecnologias I4.0 guiada apenas por critérios econômicos e financeiros pode ser arriscada, pois fornece apenas uma visão parcial das consequências esperadas, desejáveis ou indesejáveis. Nosso estudo empírico expôs a necessidade de separar a análise de investimento em três categorias que refletem melhor as fases que uma empresa enfrentará durante sua jornada para I4.0, ou seja, investimento estratégico ou estruturante, investimentos criadores de valor e investimentos laterais. Como a maioria das tecnologias I4.0 não são autônomas (Benitez, Ayala e Frank 2020), alguns investimentos com baixo retorno econômico e financeiro deve ser feito para criar as bases para aqueles que proporcionarão esse tipo de retorno.

Vários autores estudaram a questão da avaliação de investimentos em tecnologias no contexto da indústria de manufatura (por exemplo, Bai e Sarkis, 2017; Frank *et al.*, 2013; Jiao *et al.*, 2007). No entanto, o contexto da I4.0 é novo e muitos motivos tornam esse contexto diferente dos estágios anteriores da revolução industrial (Benitez, Ayala e Frank 2020; Frank, Dalenogare e Ayala 2019). A Indústria 4.0 implica em interações complexas entre a dimensão da tecnologia e as dimensões social, organizacional e ambiental (Oesterreich e Teuteberg, 2016). Por causa disso, Beier *et al.* (2020) e Dalenogare *et al.* (2018) observaram que a adoção bem-sucedida de tecnologias I4.0 requer uma perspectiva de análise mais ampla e sistêmica. Com base em uma exploração profunda da literatura I4.0 e das teorias da Difusão da Inovação e Sociotécnica, nós oferecemos uma visão sistêmica para medir a complexidade tecnológica, o ambiente externo, o trabalho organizacional e os elementos sociais nas decisões de investimento. Consequentemente, o índice integrativo proposto fornece flexibilidade para avaliar projetos complexos de I4.0 e representar o contexto de decisão de cada empresa a partir das definições dos pesos de cada perspectiva de análise e peso de cada classificação do tipo do investimento.

4.5.1 Contribuição teórica e implicações

Este artigo fornece duas contribuições principais para as lacunas da literatura. Uma lacuna é que os modelos atuais não consideram a integração de soluções tecnológicas I4.0 com sistemas de produção existentes. Nesse sentido, este estudo propõe uma abordagem que ajuda a avaliar e otimizar a complexa relação entre as tecnologias I4.0 e os requisitos atuais do sistema de produção. Além disso, este estudo também contribui para uma segunda lacuna: a maioria dos modelos existentes considera apenas critérios técnicos. Como contribuição, o modelo proposto propõe a avaliação de fatores sociotécnicos, incluindo pessoas, estrutura organizacional e contexto do ambiente. Tais fatores têm se mostrado relevantes na implementação da Indústria 4.0 (Marcon *et al.*, 2021; Tabim *et al.*, 2021), mas estudos anteriores analisaram apenas correlações e benefícios qualitativos, enquanto métodos e modelos de avaliação de investimentos não consideraram uma abordagem tão integradora no domínio da Indústria 4.0.

O framework pode ser comparado com estudos anteriores na literatura, como Bai *et al.* (2020), Dreyer *et al.* (2020), Felsberger *et al.* (2020), Bai e Sarkis (2017) e Frank *et al.* (2013), que propõem modelos para avaliação de investimentos em tecnologias. No entanto, a principal diferença em nosso framework é a adição de uma perspectiva sociotécnica para orientar a decisão de investimento. O uso de uma perspectiva sociotécnica na Indústria 4.0 provou ser um importante fator de sucesso quando as tecnologias da Indústria 4.0 são adotadas (Marcon *et al.* 2021). Seguindo tais constatações, nosso framework adota essa visão ao considerar elementos essenciais para a correta seleção de investimentos da Indústria 4.0, incluindo complexidade tecnológica, ambiente externo, trabalho organizacional e aspectos sociais. Além disso, a estrutura fornece um procedimento para medir o efeito desses elementos, melhorando a confiabilidade das decisões de investimento (Brynjolfsson e Hitt 1996). Portanto, o estudo contribui ao determinar um índice integrativo por meio desse referencial. Esse índice combina a avaliação tradicional de investimentos – envolvendo aspectos econômico-financeiros – com a perspectiva sociotécnica. Esta abordagem implica maior flexibilidade na tomada de decisão, o que permite avaliar projetos de alta complexidade relacionados à adoção de tecnologias I4.0. Conforme sugerido por Cheng *et al.* (2018) e Frank, Dalenogare e Ayala (2019), a maturidade em tecnologias I4.0 é obtida pela adoção progressiva dessas tecnologias.

Com base na função de agregação OWA adotada para determinar o índice integrativo, nossa estrutura pode evitar a dificuldade de comparar potenciais investimentos em tecnologias no

contexto I4.0. Segundo Bai e Sarkis (2017), uma decisão de investimento é complexa porque diferentes tecnologias podem não ser diretamente comparáveis. Além disso, neste momento, os investimentos em tecnologias I4.0 envolvem, em sua maioria, soluções tecnológicas desconhecidas pelas empresas de manufatura (Pacchini *et al.* 2019), muitas vezes sem base de comparação. Nesse contexto, nosso framework é útil porque não requer comparações entre potenciais investimentos em tecnologias, mas sim compara-os com um resultado ideal desejado pela empresa. Além disso, a definição dos pesos de cada dimensão de análise, além do peso atribuído a cada classificação do tipo do investimento, para a definição do índice integrativo do investimento é flexível para representar o contexto de cada empresa. Dessa forma, a representatividade da perspectiva financeira, econômica e sociotécnica na composição do índice integrativo do investimento irá variar conforme o contexto de cada organização.

Por fim, podemos considerar que o framework proposto, baseado na IDT (Rogers 2003), é uma das primeiras tentativas de sistematizar o processo de criação, mensuração e decisão de investimentos em tecnologias I4.0. Ao fazer isso, nosso framework fornece uma diretriz para medir fatores negligenciados por modelos anteriores de avaliação de investimentos.

4.5.2 Contribuição prática e implicações

Nossos resultados podem contribuir para empresas de manufatura que buscam investir em tecnologias I4.0, fornecendo um passo a passo do processo de tomada de decisão de investimentos, diminuindo a dificuldade atual de estimar o retorno sobre esses investimentos (Benitez, Ayala e Frank 2020). Os gerentes podem usar nosso framework para obter mais clareza em seus processos de avaliação de investimentos. Identificar os requisitos e os benefícios esperados antes de decidir sobre a adoção ou rejeição de determinadas tecnologias permite priorizar potenciais investimentos em tecnologia, justificá-los e rejeitar projetos indesejáveis. Além disso, esse processo pode ser seguido pela agregação de contribuições de vários tomadores de decisão.

O framework proposto e os resultados do nosso estudo de caso empírico nos permitiram identificar alguns insights para os tomadores de decisão. Primeiro, a estrutura evidencia a necessidade de uma definição estratégica da jornada I4.0 da empresa. Nesse caminho, podem surgir projetos que a empresa talvez não consiga executar no momento. Nesse sentido, nosso arcabouço leva os gestores a avaliar as condicionantes prévias, que por vezes podem apontar para

uma rejeição provisória dos projetos. Em alguns casos, para lidar com esses projetos, nosso estudo de caso identificou o uso de PoCs como alternativa. Essa é uma prática adotada pela AGRI para testar os impactos desses projetos em menor escala antes de tomar uma decisão final sobre sua implementação.

Outra contribuição do nosso estudo é uma classificação das diferentes categorias de investimentos em tecnologias I4.0. A classificação dos investimentos em investimento estratégico ou estruturante, investimento gerador de valor e investimento lateral ajuda os gestores a entenderem quais retornos esperar de cada tipo de investimento e quais fatores devem ser priorizados na avaliação do investimento. Também esclarece a relação entre os investimentos nas diferentes etapas da jornada da Indústria 4.0. Dessa forma, projetos podem ser planejados para serem complementados no futuro (Benitez *et al.* 2021). Por exemplo, um sistema ERP (Enterprise Resource Planning) pode ser implementado e preparado para integração futura com um MES (sistema de execução de manufatura) (Frank, Dalenogare e Ayala 2019). Ou novas máquinas podem ser implementadas com o mesmo protocolo para se comunicar via IoT e M2M no futuro (Kagermann, Wahlster e Helbig 2013). Por fim, nosso estudo também identificou um conjunto de critérios que os gestores podem adotar para orientar suas decisões de investimento em I4.0.

4.5.3 Limitações e pesquisas futuras

Embora nosso framework considere aspectos estratégicos em que a adequação pode ser um dos alvos perseguidos pelas empresas ou uma exigência regulatória, uma limitação é que esta dimensão não foi um aspecto central do framework proposto para a avaliação de investimentos em tecnologias I4.0. Embora a manufatura esteja se movendo em direção a uma perspectiva verde, essa dimensão pode exigir que se torne uma dimensão sociotécnica adicional e não apenas um dos elementos das quatro dimensões consideradas, conforme proposto anteriormente em outras estruturas multicritério para avaliação de tecnologias (Frank *et al.*, 2016). Em segundo lugar, aplicamos nosso framework em uma empresa de grande porte com uma estratégia e planos de investimentos claros. No entanto, ser um estudo de caso único pode ser uma limitação para a generalização dos nossos achados. Assim, encorajamos outros pesquisadores a testarem nosso framework em outras empresas. Pesquisas futuras também podem testar e adaptar o framework para pequenas e médias empresas que precisam de uma visão estruturada de sua estratégia operacional antes de investir em tecnologias I4.0. Além disso, como o nosso modelo apenas apoia os gestores nas fases iniciais da decisão de investir ou não num determinado projeto, sugere-se a

futura incorporação de uma ferramenta de avaliação durante as fases de implementação dos projetos I4.0. Essa ferramenta pode ser adaptada ao contexto da Indústria 4.0 para apoiar as decisões em andamento, como continuar, reduzir, abandonar ou expandir o projeto escolhido. Outra oportunidade é agregar avaliação de risco, aspectos estratégicos e de sustentabilidade na etapa de persuasão para avaliar investimentos em tecnologias I4.0, complementando as três perspectivas consideradas neste estudo. Nesse sentido, nosso trabalho oferece uma etapa inicial de uma estrutura de tomada de decisão de projetos de investimentos que pode apoiar estudiosos em estudos futuros, incorporando um escopo mais amplo de critérios e perspectivas para a avaliação de investimento em tecnologias da Indústria 4.0. Por fim, nosso estudo se concentra apenas nos investimentos em tecnologias I4.0 para a dimensão da manufatura. Como o I4.0 também compreende outras dimensões, como trabalho inteligente, produtos inteligentes e cadeia de suprimentos inteligente (Frank, Dalenogare e Ayala 2019; Fettermann *et al.* 2020), pesquisas futuras podem estudar investimentos em tecnologias nessas outras dimensões em que aspectos de critérios e estratégias podem diferir.

4.6 Referências

- Agostini, L., and A. Nosella. 2019. "The adoption of Industry 4.0 technologies in SMEs: results of an International study." *Management Decision* 58 (4): 625–43. <https://doi.org/10.1108/MD-09-2018-0973>.
- Agrifoglio, R., C. Cannavale, E. Laurenza, and C. Metallo. 2017. "How emerging digital technologies affect operations management through co-creation. Empirical evidence from the maritime industry." *Production Planning & Control* 28 (16): 1298–1306. <https://doi.org/10.1080/09537287.2017.1375150>.
- Alshamaila, Y., S. Papagiannidis, and F. Li. 2013. "Cloud computing adoption by SMEs in the north east of England: A multi-perspective framework." *Journal of Enterprise Information Management* 26 (3): 250–75. <https://doi.org/10.1108/17410391311325225>.
- Atkinson, A. A., R. S. Kaplan, E. M. Matsumura, and S. M. Young. 2012. *Management accounting: information for decision making and strategy execution*. Pearson Education.
- Bai, C., and J. Sarkis. 2017. "Improving Green Flexibility through Advanced Manufacturing Technology Investment: Modeling the Decision Process." *International Journal of Production Economics* 188: 86–104. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.013>.
- Bai, C., P. Dallasega, G. Orzes, and J. Sarkis. 2020. "Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective." *International Journal of Production Economics* 229: 107776. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>.
- Bednar, P. M., and C. Welch. 2019. "Socio-Technical Perspectives on Smart Working: Creating Meaningful and Sustainable Systems." *Information Systems Frontiers*. <https://doi.org/10.1007/s10796-019-09921-1>.
- Beier, G., A. Ullrich, S. Niehoff, M. Reißig, and M. Habich. 2020. "Industry 4.0: How it is defined

- from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes - A literature review.” *Journal of Cleaner Production* 259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120856>.
- Benitez, G. B., M. Ferreira-Lima, N. F. Ayala, and A. G. Frank. 2021. “Industry 4.0 technology provision: the moderating role of supply chain partners to support technology providers.” *Supply Chain Management: An International Journal*. <https://doi.org/10.1108/SCM-07-2020-0304>.
- Benitez, G. B., N. F. Ayala, and A. G. Frank. 2020. “Industry 4.0 innovation ecosystems: An evolutionary perspective on value cocreation.” *International Journal of Production Economics* 228 (October): 107735. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107735>.
- Bose, R., and X. Luo. 2011. “Integrative framework for assessing firms’ potential to undertake Green IT initiatives via virtualization - A theoretical perspective.” *Journal of Strategic Information Systems* 20 (1): 38–54. <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2011.01.003>.
- Bosman, L., Hartman, N. and Sutherland, J. 2019. “How manufacturing firm characteristics can influence decision making for investing in Industry 4.0 technologies.” *Journal of Manufacturing Technology Management*.
- Brynjolfsson, E., and L. Hitt. 1996. “Paradox Lost? Firm-Level Evidence on the Returns to Information Systems Spending.” *Management Science* 42 (4): 541–58. <https://doi.org/10.1287/mnsc.42.4.541>.
- Chan, F. T. S., M. H. Chan, H. Lau, and R. W. L. Ip. 2001. “Investment appraisal Techniques for advanced manufacturing technology (AMT): a literature review.” *Integrated Manufacturing Systems* 12 (1): 35–47. <https://doi.org/10.1108/09576060110361528>.
- Cheng, Y., R. Matthiesen, S. Farooq, J. Johansen, H. Hu, and L. Ma. 2018. “The evolution of investment patterns on advanced manufacturing technology (AMT) in manufacturing operations: A longitudinal analysis.” *International Journal of Production Economics* 203: 239–53. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.06.019>.
- Cherns, A. 1976. “The Principles of Sociotechnical Design.” *Human Relations* 8 (9): 783–92.
- Contador, J. C., W. C. Satyro, J. L. Contador, and M. M. Spinola. 2020. “Flexibility in the Brazilian Industry 4.0: Challenges and Opportunities.” *Global Journal of Flexible Systems Management*. <https://doi.org/10.1007/s40171-020-00240-y>.
- Copeland, T. E., F. J. Weston, and K. Shastri. 2004. *Financial Theory and Corporate Policy*. 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Dalenogare, L. S., G. B. Benitez, N. F. Ayala, and A. G. Frank. 2018. “The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance.” *International Journal of Production Economics* 204 (October): 383–94. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>.
- Dalenogare, L. S., Baseggio, M. M., Ayala, N. F., Le Dain, M. A., & Frank, A. G. (2019). The contribution of Smart Glasses for PSS. *Procedia CIRP*, 83, 318-323. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.307>
- Davies, P., G. Parry, K. Alves, and I. Ng. 2020. “How additive manufacturing allows products to absorb variety in use: empirical evidence from the defence industry.” *Production Planning & Control* 0 (0): 1–18. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1810763>.
- Davies, R., T. Coole, and A. Smith. 2017. “Review of socio-technical considerations to ensure successful implementation of Industry 4.0.” *Procedia Manufacturing* 11: 1288–95. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.256>.
- Davis, M. C., R. Challenger, D. N. W. Jayewardene, and C. W. Clegg. 2014. “Advancing socio-technical systems thinking: A call for bravery.” *Applied Ergonomics* 45 (2): 171–80.

<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.02.009>.

Dornelles, J., de A., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2021). "Smart Working in Industry 4.0: how digital technologies enhance manufacturing workers' activities", *Computers & Industrial Engineering*, 107804. doi: 10.1016/j.cie.2021.107804

Dreyer, S., A. Egger, L. Püschel, and M. Röglinger. 2020. "Prioritising smart factory investments - A project portfolio selection approach." *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1849845>.

Enrique, D. V., Ayala, N. F., Lima, M. J. D. R. F., Marodin, G. A., Gzara, L., & Frank, A. G. 2018. The use of ICT tools to support collaborative product development activities: evidences from Brazilian industry. *Production*, 28. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20170099>

Evans, L., N. Lohse, and M. Summers. 2013. "A fuzzy-decision-tree approach for manufacturing technology selection exploiting experience-based information." *Expert Systems with Applications* 40 (16): 6412–26. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.05.047>.

Felsberger, A., F. H. Qaiser, A. Choudhary, and G. Reiner. 2020. "The impact of Industry 4.0 on the reconciliation of dynamic capabilities: evidence from the European manufacturing industries." *Production Planning & Control* 0 (0): 1–24. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1810765>.

Fettermann, D. C., Cavalcante, C. G. S., Ayala, N. F., & Avalone, M. C. (2020). Configuration of a smart meter for Brazilian customers. *Energy Policy*, 139, 111309. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111309>

Frank, A. G., D. V. S. Souza, J. L. D. Ribeiro, and M. E. Echeveste. 2013. "A framework for decision-making in investment alternatives selection." *International Journal of Production Research* 51 (19): 5866–83. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.802393>.

Frank, A. G., L. S. Dalenogare, and N. F. Ayala. 2019. "Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies." *International Journal of Production Economics* 210 (January): 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>.

Frank, A. G., N. D. Molle, W. Gerstlberger, J. A. B. Bernardi, and D. C. Pedrini. 2016. "An integrative environmental performance index for benchmarking in oil and gas industry." *Journal of Cleaner Production* 133: 1190–1203. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.064>.

Ghobakhloo, M. 2018. "The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0." *Journal of Manufacturing Technology Management* 29 (6): 910–36. <https://doi.org/10.1108/JMTM-02-2018-0057>.

Ghobakhloo, M. 2019. "Determinants of information and digital technology implementation for smart manufacturing." *International Journal of Production Research* 0 (0): 1–22. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1630775>.

Ghobakhloo, M., and N. T. Ching. 2019. "Adoption of Digital Technologies of Smart Manufacturing in SMEs." *Journal of Industrial Information Integration* 16. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2019.100107>.

Gillani, F., K. A. Chatha, M. S. S. Jajja, and S. Farooq. 2020. "Implementation of digital manufacturing technologies: Antecedents and consequences." *International Journal of Production Economics* 229 (November): 107748. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107748>.

Hendrick, H. W., and B. M. Kleiner. 2001. *Macroergonomics: An introduction to work system design*. Human Factors and Ergonomics Society.

Herceg, I. V., V. Kuc, V. M. Mijuskovic, and T. Herceg. 2020. "Challenges and Driving Forces for Industry 4.0 Implementation." *Sustainability* 12 (10). <https://doi.org/10.3390/su12104208>.

- Horváth, D., and R. Z. Szabó. 2019. "Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities?" *Technological Forecasting and Social Change* 146: 119–32. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.05.021>.
- Hoyer, C., I. Gunawan, and C. H. Reaiche. 2020. "The Implementation of Industry 4.0 – A Systematic Literature Review of the Key Factors." *Systems Research and Behavioral Science*. <https://doi.org/10.1002/sres.2701>.
- Jiao, Y-Y, J. Du, and J. R. Jiao. 2007. "A financial model of flexible manufacturing systems planning under uncertainty: identification, valuation and applications of real options." *International Journal of Production Research* 45 (6): 1389–1404. <https://doi.org/10.1080/10298430600677479>.
- Jin, L., R. Mesiar, and R. Yager. 2019. "Ordered Weighted Averaging Aggregation on Convex Poset." *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 27 (3): 612–17. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2019.2893371>.
- Kadir, B. A., O. Broberg, and C. Souza. 2019. "Current research and future perspectives on human factors and ergonomics in Industry 4.0." *Computers & Industrial Engineering* 137 (July): 106004. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106004>.
- Kagermann, H., W. Wahlster, and J. Helbig. 2013. "Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0." *Final Report of the Industrie 4.0 WG*.
- Kakati, M. 1997. "Strategic evaluation of advanced manufacturing technology." *International Journal of Production Economics* 53 (2): 141–56. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(97\)00115-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(97)00115-1).
- Kamble, S. S., A. Gunasekaran, A. Ghadge, and R. Raut. 2020. "A performance measurement system for Industry 4.0 enabled smart manufacturing system in SMMEs- A review and empirical investigation." *International Journal of Production Economics* 229: 107853. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107853>.
- Kamble, S. S., A. Gunasekaran, and R. Sharma. 2018. "Analysis of the driving and dependence power of barriers to adopt Industry 4.0 in Indian manufacturing industry." *Computers in Industry* 101: 107–19. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.06.004>.
- Kessler, E. H. (Ed.). 2013. *Encyclopedia of Management Theory*. Sage Publications.
- Kiel, D., J. M. Müller, C. Arnold, and K-I. Voigt. 2017. "Sustainable Industrial Value Creation: Benefits and Challenges of Industry 4.0." *International Journal of Innovation Management* 21 (8). <https://doi.org/10.1142/S1363919617400151>.
- Klingenberg, C. O., M. A. V. Borges, and J. A. V. Antunes. 2019. "Industry 4.0 as a data-driven paradigm: a systematic literature review on technologies." *Journal of Manufacturing Technology Management*. <https://doi.org/10.1108/JMTM-09-2018-0325>.
- Kumar, R., H. Singh, and R. Chandel. 2018. "Exploring the key success factors of advanced manufacturing technology implementation in Indian manufacturing industry." *Journal of Manufacturing Technology Management* 29 (1): 25–40. <https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2017-0057>.
- Lefley, F. 1996. "The payback method of investment appraisal: A review and synthesis." *International Journal of Production Economics* 44 (3): 207–24. [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(96\)00022-9](https://doi.org/10.1016/0925-5273(96)00022-9).
- Lin, B., W. Wu, and M. Song. 2019. "Industry 4.0: Driving factors and impacts on firm's performance: an empirical study on China's manufacturing industry." *Annals of Operations*

Research. <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03433-6>.

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

Mankiw, N. G., and M. P. Taylor. 2006. *Microeconomics*. Thomson Learning.

Marcon, E., M. Soliman, W. Gerstlberger, and A. G. Frank. "Sociotechnical factors and Industry 4.0: an integrative perspective for the adoption of smart manufacturing technologies". *Journal of Manufacturing Technology Management*, early view: 7 September 2021. <https://doi.org/10.1108/JMTM-01-2021-0017>

Masood, T., and J. Egger. 2019. "Augmented reality in support of Industry 4.0—Implementation challenges and success factors." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 58: 181–95. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.02.003>.

Meindl, B., N. F. Ayala, J. Mendonça, and A. G. Frank. 2021. "The Four Smarts of Industry 4.0: Evolution of Ten Years of Research and Future Perspectives." *Technological Forecasting and Social Change* 168 (July): 120784. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120784>.

Meridith, J. R., and N. C. Surksh. 1986. "Justification techniques for advanced manufacturing technologies." *International Journal of Production Research* 24 (5): 1043–57. <https://doi.org/10.1080/00207548608919787>.

Merigó, J. M., and M. Casanovas. 2011. "Induced aggregation operators in the Euclidean distance and its application in financial decision making." *Expert Systems with Applications* 38 (6): 7603–8. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.12.103>.

Moher, D., L. Shamseer, M. Clarke, D. Ghersi, A. Liberati, M. Petticrew, P. Shekelle, and L. A. Stewart. 2015. "Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement." *Systematic Reviews* 4 (1): 1. <https://doi.org/10.1186/2046-4053-4-1>.

Moktadir, M. A., S. M. Ali, S. Kusi-Sarpong, and M. A. A. Shaikh. 2018. "Assessing challenges for implementing Industry 4.0: Implications for process safety and environmental protection." *Process Safety and Environmental Protection* 117: 730–41. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.04.020>.

Müller, J. M., D. Kiel, and K-I. Voigt. 2018. "What Drives the Implementation of Industry 4.0? The Role of Opportunities and Challenges in the Context of Sustainability." *Sustainability* 10 (247). <https://doi.org/10.3390/su10010247>.

Nguyen, T. U. H., and T. S. Waring. 2013. "The adoption of customer relationship management (CRM) technology in SMEs: An empirical study." *Journal of Small Business and Enterprise Development* 20 (4): 824–48. <https://doi.org/10.1108/JSBED-01-2012-0013>.

O'Brien, C., and S. J. E. Smith. 1993. "Design of the decision process for strategic investment in advanced manufacturing systems." *International Journal of Production Economics* 30–31 (C): 309–22. [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(93\)90101-P](https://doi.org/10.1016/0925-5273(93)90101-P).

Oesterreich, T. D., and F. Teuteberg. 2016. "Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry." *Computers in Industry* 83: 121–39. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.09.006>.

Ordoobadi, S. M. 2012. "Application of ANP methodology in evaluation of advanced

- technologies.” *Journal of Manufacturing Technology Management* 23 (2): 229–52. <https://doi.org/10.1108/17410381211202214>.
- Pacchini, A. P. T., W. C. Lucato, F. Facchini, and G. Mummolo. 2019. “The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0.” *Computers in Industry* 113: 103125. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103125>.
- Raj, A., G. Dwivedi, A. Sharma, A. B. L. S. Jabbour, and S. Rajak. 2020. “Barriers to the Adoption of Industry 4.0 Technologies in the Manufacturing Sector: An Inter-Country Comparative Perspective.” *International Journal of Production Economics* 224: 107546. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107546>.
- Rogers, E. M. 2003. *Diffusion of Innovations*. New York, NY: Free Press. (5th ed.).
- Saaty, T. L. 2004. “Decision Making — the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP).” *Journal of Systems Science and Systems Engineering* 13 (1): 1–35. <https://doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5>.
- Sambasivarao, K. V., and S. G. Deshmukh. 1997. “A decision support system for selection and justification of advanced manufacturing technologies.” *Production Planning & Control* 8 (3): 270–84. <https://doi.org/10.1080/095372897235325>.
- Sanguinetti, A., B. Karlin, and R. Ford. 2018. “Understanding the path to smart home adoption: Segmenting and describing consumers across the innovation-decision process.” *Energy Research and Social Science* 46 (June 2017): 274–83. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.08.002>.
- Schuh, G., R. Anderl, R. Dumitrescu, A. Krüger, and M. T. Hompel. 2020. “Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies – UPDATE 2020 – (Acatech STUDY).”
- Simões, A. C., A. L. Soares, and A. C. Barros. 2020. “Factors influencing the intention of managers to adopt collaborative robots (cobots) in manufacturing organizations.” *Journal of Engineering and Technology Management* 57 (July): 101574. <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2020.101574>.
- Sony, M., and S. Naik. 2019. “Critical factors for the successful implementation of Industry 4.0: a review and future research direction.” *Production Planning & Control* 0 (0): 1–17. <https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1691278>.
- Sony, M., and S. Naik. 2020. “Industry 4.0 integration with socio-technical systems theory : A systematic review and proposed theoretical model.” *Technology in Society* 61 (April): 101248. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101248>.
- Stentoft, J., K. A. Wickstrom, K. Philipsen, and A. Haug. 2020. “Drivers and barriers for Industry 4.0 readiness and practice: empirical evidence from small and medium-sized manufacturers.” *Production Planning & Control*. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768318>.
- Strandhagen, J. W., S-V. Buer, M. Semini, E. Alfnes, and J. O. Strandhagen. 2020. “Sustainability challenges and how Industry 4.0 technologies can address them: a case study of a shipbuilding supply chain.” *Production Planning & Control* 0 (0): 1–16. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1837940>.
- Tabim, V. M., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2021), "Implementing Vertical Integration in the Industry 4.0 Journey: Which Factors Influence the Process of Information Systems Adoption?" *Information Systems Frontiers*, 1-18. doi: 10.1007/s10796-021-10220-x
- Tan, K. H., C. P. Lim, K. Platts, and H. S. Koay. 2006. “An intelligent decision support system for manufacturing technology investments.” *International Journal of Production Economics* 104

(1): 179–90. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.02.010>.

Veile, J. W., D. Kiel, J. M. Müller, and K-I. Voigt. 2019. "Lessons learned from Industry 4.0 implementation in the German manufacturing industry." *Journal of Manufacturing Technology Management*. <https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2018-0270>.

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

Wagire, A. A., R. Joshi, A. P. S. Rathore, and R. Jain. 2020. "Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice." *Production Planning & Control* 0 (0): 1–20. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1744763>.

Wei, J., P. B. Lowry, and S. Seedorf. 2015. "The assimilation of RFID technology by Chinese companies: A technology diffusion perspective." *Information and Management* 52 (6): 628–42. <https://doi.org/10.1016/j.im.2015.05.001>.

Yeh, C-C., and Y-F. Chen. 2018. "Critical success factors for adoption of 3D printing." *Technological Forecasting & Social Change* 132 (January): 209–16. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.02.003>.

Yin, R. K. 2009. *Case Study Research: Design and Methods*. Los Angeles, Cal.: Sage.

Zhou, H., G. K. Leong, P. Jonsson, and C-C. Sum. 2009. "A comparative study of advanced manufacturing technology and manufacturing infrastructure investments in Singapore and Sweden." *International Journal of Production Economics* 120 (1): 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.07.013>.

Zhu, Q., P. Shah, and J. Sarkis. 2018. "Integrating product deletion with lean and sustainable supply chain management." *International Journal of Production Economics* 205: 201–14. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.035>.

4.7 Apêndices

4.7.1 Apêndice A - Processo de Revisão Sistemática da Literatura para Identificação de Fatores Sociotécnicos

As buscas foram realizadas nas bases de dados Scopus, Web of Science e ScienceDirect. A busca inicial combinou os termos "Industry 4.0" e "sociotechnical", resultando em poucos artigos com abordagens específicas sobre critérios de avaliação de investimentos no contexto I4.0. Assim, foi definido um protocolo de busca. Usamos a combinação dos termos "Indústria 4.0" OU "manufatura inteligente" OU "Manufatura avançada" E "adoção" OU "implementação" OU "critérios" OU "determinantes" OU "desafios" OU "fatores" OU "barreiras" no título, E "Sistema de produção" OR "manufatura" no título-resumo–palavras-chave. Esta busca inicial forneceu 605 artigos. Foram selecionados apenas artigos até 2015, em inglês (199 artigos). Em seguida, os artigos duplicados foram removidos (128 artigos). Dois outros filtros foram aplicados: (i) Tipo de publicação: artigos de periódicos; e (ii) Conteúdo: Artigos que destacaram fatores relacionados à

adoção de tecnologias I4.0 (27 artigos). Finalmente, cinco artigos adicionais foram selecionados, usando técnicas de bola de neve para frente e para trás (32 artigos).

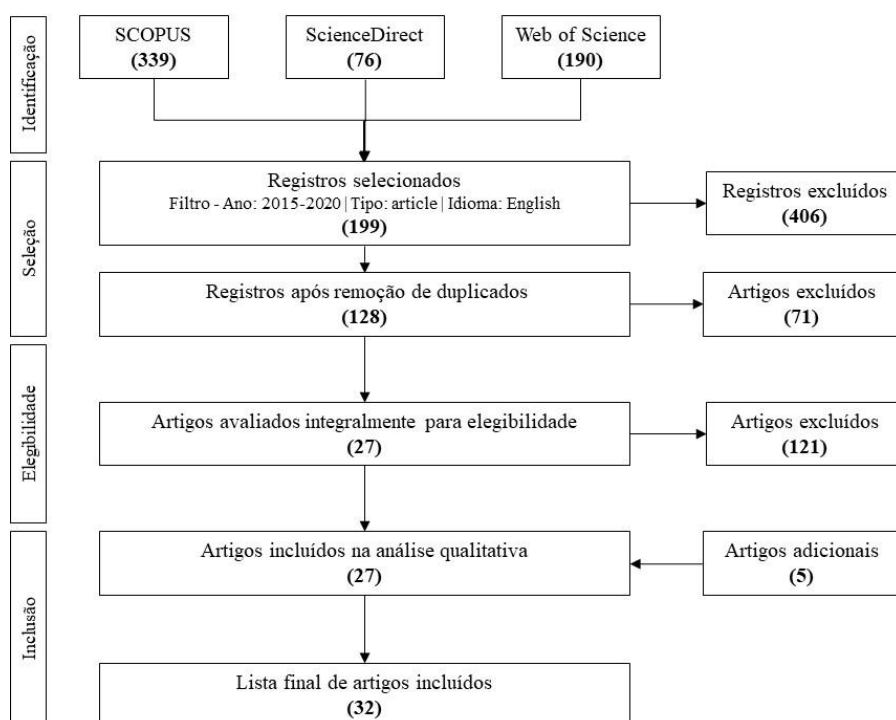


Figura 5: Processo para seleção de artigos

4.7.2 Apêndice B - Informações sobre os especialistas que participaram da avaliação da lista de Fatores Sociotécnicos

Especialista	Campo	Função	Área ou campo de pesquisa	Experiência	Países com atividades
1	Academia	Professor de Engenharia Industrial e pesquisador, Ph.D.	Indústria 4.0 e Servitização	> 13 anos	Brasil e França
2	Academia	Professor associado de Engenharia Industrial e pesquisador, Ph.D.	Servitização, Indústria 4.0 e Transformação	> 14 anos	Brasil e Itália
3	Academia	Estudante de Pós Doc. em Engenharia Industrial, Ph.D.	Indústria 4.0, Ecossistemas, e Cadeia de Suprimentos	> 7 anos	Brasil e Itália
4	Academia	Doutorando em Engenharia Industrial	Indústria 4.0 e Sistemas Inteligentes de Produto-Serviço	> 10 anos	Brasil e França
5	Academia	Professor associado de Engenharia Industrial e Consultor	Engenharia Econômica, Custos, e Avaliação de Investimentos	> 40 anos	Brasil e França
6	Indústria	Diretor executivo	Indústria 4.0 e Automação Industrial	> 22 anos	Brasil
7	Indústria	Diretor de Instituto de Tecnologia, Ph.D.	Manufatura Digital e Gestão da Inovação	> 20 anos	Brasil e Alemanha
8	Indústria	Engenheiro de Processos de Manufatura Digital	Manufatura Digital e Engenharia Industrial	> 15 anos	Brasil
9	Indústria	Engenheiro de Processos da Indústria 4.0	Indústria 4.0 e Engenharia Industrial	> 5 anos	Brasil e Inglaterra

4.7.3 Apêndice C - Informações sobre os especialistas da AGRI que participaram do teste e validação do framework

Entrevistado	Função	Área	Experiência	Experiência na AGRI
Especialista 1	Gerente de Engenharia de Manufatura Avançada	Manufatura Avançada	> 25 anos	> 18 anos
Especialista 2	Engenheiro de Processos da Indústria 4.0	Manufatura Avançada	> 10 anos	> 4 anos
Especialista 3	Engenheiro de Melhoria Contínua	Manufatura Avançada	> 7 anos	> 5 anos
Especialista 4	Gerente de TI	Unidade Manufatura	> 30 anos	> 7 anos
Especialista 5	Gerente de Engenharia de Produto	Desenvolvimento e implantação de novos produtos	> 10 anos	> 5 anos

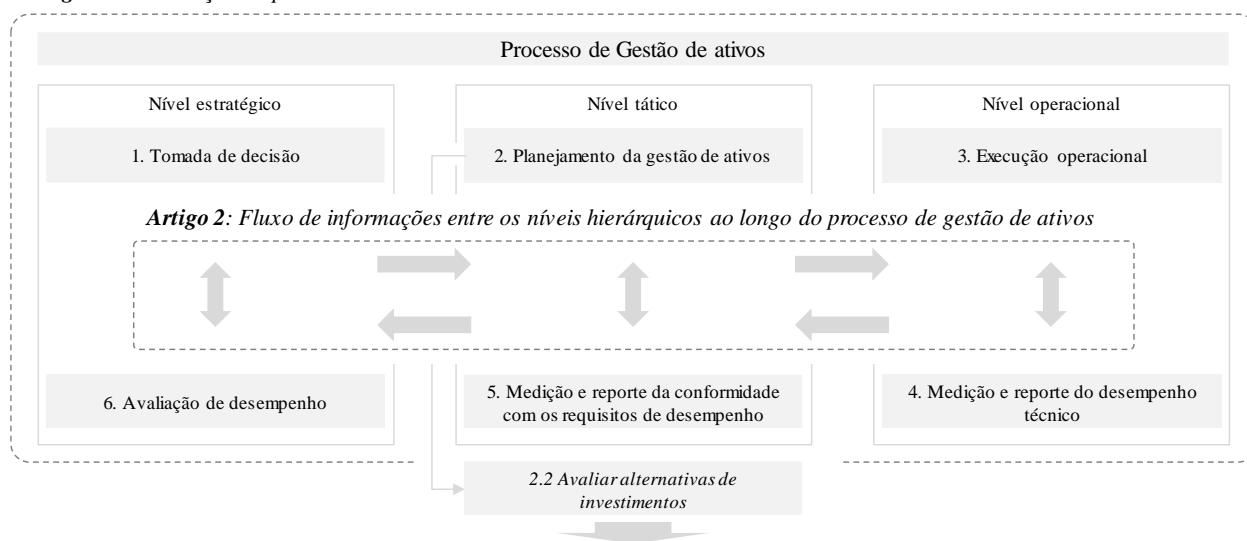
4.7.4 Apêndice D - Planilha para avaliação dos critérios sociotécnicos

Avaliação dos impactos Sociotécnicos					
Projeto:		Especialista:			
Impacto sociotécnico (STS)	Resultado STS = 1.86		Escala de julgamento		
			Desejável	Indesejável	
			1	1	Impacto inexistente
			2	2	Impacto baixo
			3	3	Impacto moderado
			4	4	Impacto alto
		5	5	Impacto muito alto	
Critério	Peso	Justificativa			
Tecnologia (T)	0.211				
Maturidade tecnológica (T1)	0.44	4.00	1.00		
Complexidade tecnológica (T2)	0.25	1.00	1.00		
Compatibilidade tecnológica (T3)	0.31	3.00	1.00		
Organização (O)	0.322				
Prontidão do sistema de produção (O1)	0.40	1.00	2.00		
Estrutura organizacional (O2)	0.23	1.00	1.00		
Processos organizacionais (O3)	0.37	3.00	1.00		
Ambiente (E)	0.246				
Pressão competitiva (E1)	0.29	3.00	1.00		
Conformidade regulatória (E2)	0.48	1.00	1.00		
Condições do fornecedor (E3)	0.23	4.00	3.00		
Social (S)	0.220				
Condições de trabalho (S1)	0.53	3.00	1.00		
Aceitação das novas tecnologias pelas pessoas (S2)	0.27	3.00	1.00		
Habilidades e competências da força de trabalho (S3)	0.20	1.00	1.00		
	1.00	2.32	1.24		

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tese defende a ideia de que a gestão de ativos físicos precisa adotar uma visão holística, onde o processo de gestão de ativos tenha uma configuração multidisciplinar, considerando todas as etapas do ciclo de vida dos ativos físicos, conforme defendido por Aghabegloo *et al.* (2024), Maletič *et al.* (2020), El-Akruti *et al.* (2013) e Shuman e Brent (2005). Assim, esta tese explora o processo de tomada decisão que envolve cada etapa do processo de gestão de ativos físicos. Neste sentido, este estudo aborda a avaliação de investimentos, que é um dos desafios presentes na etapa planejamento do processo de gestão de ativos. De forma específica, esta tese aborda a avaliação de investimento em tecnologias da Indústria 4.0, a partir da adoção de uma abordagem multidisciplinar, envolvendo as perspectivas tradicionalmente utilizadas, econômica e financeira, com a perspectiva sociotécnica para orientar as decisões de investimentos, em empresas de manufatura. Os resultados desta tese foram alcançados com a realização de três artigos, conforme ilustrado na Figura 1.

Artigo 1: Estruturação do processo de Gestão de ativos



Artigo 2: Fluxo de informações entre os níveis hierárquicos ao longo do processo de gestão de ativos

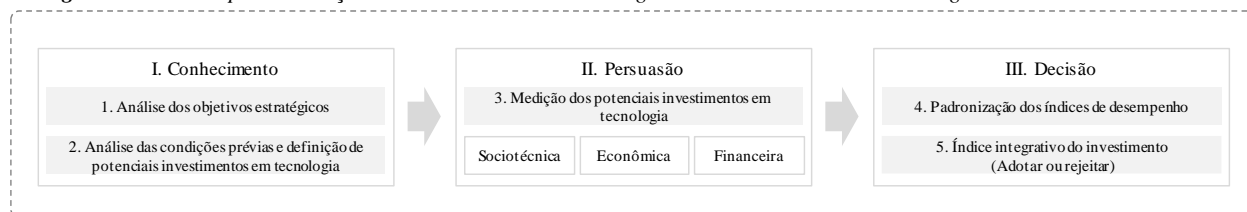


Figura 1: Visão geral da tese

No artigo 1 foi proposto a estruturação do processo de gestão de ativos físicos em empresas de manufatura, baseado na literatura, padrões normativos, e no conhecimento de especialistas. Além disso, foi avaliado o nível de implementação do processo de gestão de ativos

em três empresas multinacionais de manufatura. O artigo 2 explora o processo de tomada de decisão nas etapas do processo de gestão de ativos físicos. Este estudo também identifica alguns desafios e oportunidades trazidas pelo avanço tecnológico, em especial tecnologias da Indústria 4.0, como suporte ao processo de tomada de decisão da gestão de ativos. Por fim, o artigo 3 apresenta um framework que orienta especificamente a avaliação de investimentos em tecnologias da Indústria 4.0. O estudo também fornece critérios conceituais para a avaliação de investimentos, além de uma abordagem metodológica para combinar dados quantitativos e qualitativos, que conforme demonstrados no estudo, são fatores relevantes para avaliar investimentos em tecnologias da Indústria 4.0. Por fim, o artigo 3 apresentou um estudo de caso em uma empresa multinacional de manufatura, que permitiu avaliar a aplicabilidade do framework proposto, através da análise de dez projetos de investimentos em tecnologias I4.0.

Enquanto os artigos 1 e 2 apresentam uma abordagem generalista do processo de gestão de ativos, o artigo 3 explora em maior profundidade o tema de avaliação de investimentos, que é um dos desafios da gestão de ativos, analisando especificamente o contexto de tecnologias I4.0. A abordagem de estruturação de um processo robusto de gestão de ativos físicos desempenha um papel crucial para as empresas de capital intensivo. Essa estrutura não só permite avaliar e gerenciar a base de ativos existentes, mas também oferece a oportunidade de revisar e realinhar a estrutura de ativos da organização de acordo com as necessidades do negócio. De maneira complementar, é visto que as tecnologias I4.0 oferecem contribuições significativas para superar as lacunas existentes no processo de gestão de ativos físicos. Elas não apenas abordam as dificuldades operacionais, como a falta de integração entre sistemas de informações e a distância temporal entre atividades do ciclo de vida dos ativos, mas também oferecem novas oportunidades para melhorar a eficiência e a tomada de decisões. No entanto, a implementação dessas tecnologias exige investimentos substanciais por parte das empresas.

Embora as tecnologias I4.0 representem uma promissora solução para aprimorar os processos de gestão de ativos físicos, a decisão de investir nessas tecnologias apresenta desafios para as empresas. A avaliação estratégica dos investimentos em tecnologias da I4.0 deve considerar diversos fatores, incluindo o retorno sobre o investimento, alinhamento com metas estratégicas e integração com os sistemas existentes. A complexidade dessa escolha reside na diversidade de opções disponíveis e na necessidade de alinhar essas tecnologias aos objetivos de negócio da empresa.

Portanto, a implementação bem-sucedida das tecnologias I4.0 requer uma abordagem integrada que leve em consideração não apenas os benefícios operacionais, mas também os

aspectos estratégicos, econômicos, financeiros e sociotécnicos. Essa abordagem estratégica e integrada é essencial para garantir que os investimentos em tecnologias I4.0 estejam alinhados com os objetivos da empresa e proporcionem um impacto positivo na gestão dos ativos físicos.

Dessa forma, a principal contribuição desta tese está situada na proposição do framework que suporta a avaliação de investimentos. A partir da integração das teorias da Difusão da Inovação e Sociotécnica, o framework proposto é composto por três estágios principais (conhecimento, persuasão e decisão) para orientar os profissionais por meio da análise de investimentos em I4.0 a partir de três perspectivas: fatores econômicos, financeiros e sociotécnicos. A inserção desta última perspectiva permite endereçar os desafios além dos aspectos técnicos e quantitativos presentes nos investimentos em tecnologias I4.0 (Bosman, Hartman e Sutherland 2019). A presença desses aspectos qualitativos subjetivos em relação a adoção de tecnologias I4.0 tornam as decisões de investimentos uma tarefa complexa, exigindo adoção de métodos robustos para suportar estas decisões (Tabim *et al.*, 2021; Bai *et al.* 2020; Dreyer *et al.* 2020; Bai and Sarkis 2017). Neste sentido, o framework fornece um passo a passo claro de como avaliar estes investimentos, suportando assim profissionais na determinação do retorno sobre investimentos em tecnologias I4.0.

Diferentemente dos modelos atuais, o framework proposto inclui na análise os aspectos relacionados a integração das novas tecnologias I4.0 com os sistemas de produção existentes. Além disso, o framework não limita a análise a fatores técnicos como tradicionalmente ocorre, inserindo na avaliação fatores sociotécnicos, pessoas, estrutura organizacional e contexto do ambiente, que são fatores relevantes na implementação das tecnologias I4.0 (Marcon *et al.*, 2021; Tabim *et al.*, 2021). Além do framework, a abordagem de investimentos apresentada nesse estudo traz novos insights práticos, como por exemplo, na forma de classificar os projetos de investimentos em tecnologias I4.0 em três categorias: investimentos estratégicos ou estruturantes, de criação de valor e laterais. Deste modo, os resultados deste estudo podem contribuir com empresas que buscam investir em tecnologias I4.0, auxiliando a gestão a determinar o retorno sobre os investimentos em tecnologias I4.0, o que irá orientar a decisão de adoção ou rejeição de determinados investimentos.

Embora o estudo tenha apresentado uma abordagem diferente das disponíveis na literatura, principalmente no que tange a avaliação de investimentos, algumas limitações podem ser endereçadas em pesquisas futuras. Por ter sido um estudo de caso único para testar o framework de avaliação de investimentos proposto, é indicada a aplicação deste em outras empresas, inclusive pode-se testar e ajustar o mesmo para o contexto de pequenas e médias empresas. Da mesma

forma, a validação do modelo de gestão de ativos ocorreu com uma amostra de apenas três empresas. Desse modo, sugere-se a reprodução da análise em uma amostra maior de empresas de capital intensivo, até mesmo explorar características intrínsecas de setores e empresas específicas. Outras oportunidades são estudos de caso para avaliar os desafios da operacionalização e da manutenção dos processos de gestão de ativos físicos em empresas de manufatura. Outro aspecto do framework de avaliação de investimento é este estar orientado para as fases iniciais da decisão de investir ou não num determinado projeto. Assim, estudos futuros podem incorporar ferramentas de avaliação durante as fases de implementação dos projetos, auxiliando em decisões de como continuar, reduzir, abandonar ou expandir um projeto escolhido. Outra oportunidade para complementar o framework de avaliação de investimentos é a inserção de aspectos estratégicos, de sustentabilidade e avaliação de riscos na etapa de persuasão para orientar a decisão de investimentos em tecnologias I4.0.