

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC
Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Industrial

DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS

**TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 NO TRANSPORTE
FERROVIÁRIO DE CARGAS: proposição de um modelo para
auxílio à tomada de decisão nos territórios de identidade do estado
da Bahia**

Salvador

2024

DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS

**TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 NO TRANSPORTE
FERROVIÁRIO DE CARGAS: Proposição de um modelo
para auxílio à tomada de decisão nos territórios de identidade
do estado da Bahia**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Industrial do Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Aloísio Santos Nascimento Filho.

Coorientador: Prof. Dr. Carlos César Ribeiro Santos.

Salvador

2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

S237a Santos, Daniel Rodrigues dos

Tecnologias da indústria 4.0 no transporte ferroviário de cargas: proposição de um modelo para auxílio à tomada de decisão nos territórios de identidade do Estado da Bahia / Daniel Rodrigues dos Santos. – Salvador, 2024.

109 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Aloísio Santos Nascimento Filho.

Coorientador: Prof. Dr. Carlos César Ribeiro Santos.

Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2024.

Inclui referências.

1. Ferrovias. 2. Indústria 4.0. 3. Territórios de identidade. 4. Tomada de decisão. 5. Design Science Research. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Nascimento Filho, Aloísio Santos. III. Santos, Carlos César Ribeiro. IV. Título.

CDD 658.7882

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia Industrial

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada **“TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 NO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGAS: PROPOSIÇÃO DE UM MODELO PARA AUXÍLIO À TOMADA DE DECISÃO NOS TERRITÓRIOS DE IDENTIDADE DO ESTADO DA BAHIA”** apresentada no dia 28 de junho de 2024, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Assinado eletronicamente por:
Aloísio Santos Nascimento Filho
CPF: ***.459.665-**
Data: 01/07/2024 13:09:55 -03:00

Orientador:

Prof. Dr. Aloísio Santos Nascimento Filho
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:
Carlos César Ribeiro Santos
CPF: ***.141.945-**
Data: 01/07/2024 13:28:53 -03:00

Coorientador:

Prof. Dr. Carlos César Ribeiro Santos
FIEB

Assinado eletronicamente por:
Francisco Uchoa Passos
CPF: ***.670.117-**
Data: 03/07/2024 16:56:45 -03:00

Membro Interno:

Prof. Dr. Francisco Uchoa Passos
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:
Marcelo Santana Silva
CPF: ***.910.625-**
Data: 01/07/2024 11:29:08 -03:00

Membro Externo:

Prof. Dr. Marcelo Santana Silva
IFBA

Dedico este trabalho ao Eu Sou, o Deus que tudo sabe e tudo vê, pois sempre esteve comigo em todos os momentos. Obrigado, meu Deus!

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu eterno Yahweh (Shaddai, Jireh e Adonai), o Deus todo-poderoso, o provedor de tudo, o Mestre dos mestres, por me proporcionar graça, sabedoria, inteligência e discernimento para a vida.

À minha mãe, Gilcélia Rodrigues, e ao meu pai, Manoel Luiz, por todo amor, carinho, incentivo, orações e por toda uma vida dedicada aos filhos e netos. À minha esposa, Cristiane Luz, por todo amor, apoio e incentivo. Aos meus filhos, herança bendita de Deus, Samuel Luz Rodrigues e Esther Luz Rodrigues, por todo amor, carinho e compreensão. Ao meu enteado, David Luz, pela parceria. Às minhas irmãs, Gilcenildes Rodrigues e Jucilene Rodrigues, por todo amor, incentivo e orações e ao meu sobrinho Felipe Rodrigues pela parceria de sempre.

Ao meu orientador, Dr. Aloísio Nascimento, por todo apoio, incentivo, ensinamentos e, principalmente, por acreditar no projeto e me direcionar para participar do grupo de pesquisa, o que fez grande diferença em minha vida acadêmica. Ao meu coorientador, Dr. Carlos César, por todo apoio, parceria, incentivo e acompanhamento durante minha trajetória no mestrado.

Aos meus gestores, Leonardo Sanches, Ricardo Russel e Lucas Gomes, pelo reconhecimento, por acreditarem em meu potencial e por proporcionarem a conquista deste sonho.

Ao meu Bispo Rodrigo Castro e Pastora Stella Castro, pelo suporte espiritual em todos os momentos. À Bispa Sônia Hernandes e ao Apóstolo Estevam Hernandes, pela palavra profética liberada em minha vida.

Aos membros da banca de defesa, Dr. Francisco Uchoa Passos e Dr. Marcelo Santana Silva, por aceitarem participar desta banca e contribuírem para a minha formação, ao Dr. Alberto Xavier Pavim, pela participação relevante anteriormente na banca de qualificação.

A todos os meus colegas do CIMATEC, em especial a Márcio Bastos, Leonardo Galdino Larissa Cardozo e Renata Santos, por todo apoio, parceria e incentivo. Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para que este sonho se tornasse realidade, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O transporte ferroviário mudou a forma como as cargas são transportadas, principalmente em termos de quantidades e longas distâncias percorridas, o que trouxe para empresas e países economia de recursos e redução de poluentes ao meio ambiente. Por outro lado, as tecnologias da indústria 4.0 trouxeram para o segmento de transporte ferroviário benefícios como, manutenção preditiva baseadas em sensores nos componentes da superestrutura, sincronização entre terminais intermodais, redução de custos operacionais, entre outros. No Brasil, o modal ferroviário de cargas representa apenas 17,7% da matriz de transporte, enquanto o rodoviário tem participação de 66,2%, o que não é diferente para o estado da Bahia, assim, equilibrar a matriz de transporte pode ser um norte para o crescimento regional, visto ao escoamento da produção e a necessidade de otimizar os recursos envolvidos. Outrossim, atrelar tecnologias ao transporte ferroviário nos territórios de identidade do estado da Bahia pode trazer informações valiosas quanto aos benefícios para os setores produtivos do estado. Para isso, o objetivo do trabalho é propor um modelo prescritivo baseado nas tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 aplicáveis a projetos de implantação de transporte ferroviário de carga no estado da Bahia. Além disso, aborda a integração do setor ferroviário com as tecnologias da indústria 4.0, contemplando os territórios de identidade do estado da Bahia. O método utilizado foi a *Design Science Research* (DSR) para criação de um artefato contendo passos para auxiliar as organizações na tomada de decisão no que se refere a projeto de implantação de ferrovias com tecnologias da indústria 4.0. Utilizou-se ainda uma pesquisa quantitativa Survey com 18 especialistas do setor ferroviário contendo 17 perguntas relacionadas a tecnologias, ferrovias, estado da Bahia e métodos científicos, a qual contribuiu para a construção do artefato. Para verificar a confiabilidade das respostas, utilizou-se o Coeficiente Alfa de Cronbach, que obteve um valor de 0,8954 indicando uma alta consistência. Os resultados incluem a síntese de estudos de caso sobre tecnologias de sensores inteligentes e monitoramento remoto, bem como métodos multicritérios baseados nas respostas dos especialistas, e um artefato intitulado “Sistema de Sensoriamento - Fase Gestão” com três etapas robustas para auxiliar gestores na tomada de decisão em projetos de implantação de ferrovias com tecnologias. Espera-se que a pesquisa contribua para novos projetos de construção e expansão da malha ferroviária na Bahia e no Brasil, além de fornecer insights valiosos para estudos sobre a transformação digital do setor.

Palavras-chave: Ferrovias; indústria 4.0; territórios de identidade; tomada de decisão; Design Science Research.

ABSTRACT

Rail transport has changed the way goods are transported, especially in terms of quantities and long distances covered, bringing resource savings and reducing environmental pollutants for companies and countries. On the other hand, Industry 4.0 technologies have brought benefits to the rail transport sector, such as predictive maintenance based on sensors in superstructure components, synchronization between intermodal terminals, and operational cost reduction, among others. In Brazil, the rail freight mode represents only 17.7% of the transportation matrix, while the road mode accounts for 66.2%, which is similar in the state of Bahia. Thus, balancing the transportation matrix can be a direction for regional growth, considering the outflow of production and the need to optimize the resources involved. Moreover, linking technologies to rail transport in the identity territories of the state of Bahia can provide valuable information on the benefits for the state's productive sectors. Therefore, the aim of this work is to propose a prescriptive model based on Industry 4.0 enabling technologies applicable to rail freight transport implementation projects in the state of Bahia. Additionally, it addresses the integration of the rail sector with Industry 4.0 technologies, considering the identity territories of the state of Bahia. The method used was Design Science Research (DSR) to create an artifact containing steps to assist organizations in decision-making regarding railway implementation projects with Industry 4.0 technologies. A quantitative survey was also conducted with 18 experts from the railway sector, containing 17 questions related to technologies, railways, the state of Bahia, and scientific methods, which contributed to the construction of the artifact. To verify the reliability of the responses, Cronbach's Alpha Coefficient was used, which obtained a value of 0.8954, indicating high consistency. The results include a synthesis of case studies on intelligent sensor technologies and remote monitoring, as well as multi-criteria methods based on the experts' responses, and an artifact entitled "Sensing System - Management Phase" with three robust stages to assist managers in decision-making for railway implementation projects with technologies. It is expected that the research will contribute to new projects for the construction and expansion of the railway network in Bahia and Brazil, as well as provide valuable insights for studies on the digital transformation of the sector.

Keywords: Railways; industry 4.0; identity territories; decision-making; Design Science Research.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Via permanente	23
Figura 2: Acessórios de fixação em ferrovias	24
Figura 3: Tipos de vagões ferroviários.	25
Figura 4: Tipos de locomotivas.	26
Figura 5: Oito etapas para tomada de decisão	35
Figura 6: Territórios de identidade do estado da Bahia	37
Figura 7: Etapas para utilização do método DSR	43
Figura 8: Percurso metodológico da pesquisa	46
Figura 9: Sensores inteligentes e monitoramento	71
Figura 10: Sensores para monitoramento das rodas, trilhos e eixos dos trens	72
Figura 11: Priorização e gestão da manutenção de trilhos e lastros	73
Figura 12: Artefato - Sistema de Sensoriamento (Fase Gestão)	80
Figura 13: Exemplo de estrutura hierárquica no método AHP	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ranking de países x Km de ferrovias	18
Tabela 2: Matriz de transportes brasileira	20
Tabela 3: Revoluções industriais	26
Tabela 4: Principais tecnologias habilitadoras da indústria 4.0	27
Tabela 5: Elementos tecnológicos que complementam as tecnologias 4.0	28
Tabela 6: Atividade econômica das regiões do estado da Bahia	37
Tabela 7: Características das regiões produtivas do estado da Bahia	38
Tabela 8: Principais produtos transportados por ferrovias na Bahia	40
Tabela 9: Estrutura metodológica, etapas e conceitos.	46
Tabela 10: Etapas da pesquisa.	47
Tabela 11: Plataformas e estratégias de buscas	47
Tabela 12: Dados da aplicação do coeficiente Alfa de Cronbach no questionário	52
Tabela 13: Síntese dos estudos de casos	76
Tabela 14: Tecnologias da indústria 4.0 aplicáveis aos principais componentes da superestrutura ferroviária	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Etapas do processo decisório	31
Quadro 2: Principais métodos multicritérios para tomada de decisão	32
Quadro 3: Exemplos de métodos para decisão de localização	34
Quadro 4: Distâncias dos principais polos industriais do estado para os portos e aeroportos ..	39
Quadro 5: Formas e métodos de avaliação de um artefato	45
Quadro 6: Dados do coeficiente Alfa de Cronbach	51

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas

AMVs. Aparelhos de Mudança de Vias

ANTF. Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários

ANTAQ. Agência Nacional de Transportes Aquaviários

ANTT. Agência Nacional de Transportes Terrestres

BAMIN. Bahia Mineração

DSR. Design Science Research

FCA. Ferrovia Centro-Atlântica

FIOL. Ferrovia de Integração Oeste Leste

FIEB. Federação das Indústrias do Estado da Bahia

GPS. Global Positioning System

HSR. *High-Speed Rail*

IA. Inteligência Artificial

IEC. International Electrotechnical Commission

IoT. Internet das Coisas

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPHAN. Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

M2M. Machine to Machine

NBR. Norma Brasileira

PIB. Produto Interno Bruto

PNL. Plano Nacional de Logística

RDN. Regra De Negócio

RFFSA. Rede ferroviária Federal Sociedade Anônima

RFID. Radio Frequency Identification

TMS. Transportation Management System

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivos.....	14
1.2	Organização do Documento	15
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1	Breve panorama histórico do transporte ferroviário	16
2.2	Transporte ferroviário de cargas no Brasil	18
2.3	Marcos legais das ferrovias	20
2.4	Infraestrutura e superestrutura ferroviária para transporte de cargas	22
2.4.1	Tipos de trens.....	24
2.5	Tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 no transporte ferroviário de cargas	26
2.6	Competitividade.....	28
2.6.1	Tomada de decisão	31
2.6.1.1	Métodos de multicritério para tomada de decisão	32
2.6.1.2	Métodos de localização para tomada de decisão	34
3	ARRANJO ESPACIAL E ECONÔMICO DO ESTADO DA BAHIA.....	36
3.1	Territórios de Identidade do estado da Bahia e o modal ferroviário de cargas	36
4	MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1	Pesquisa com especialistas do setor ferroviário.....	48
4.1.1	Confiabilidade da amostra	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
5.1	Análise dos resultados da entrevista com especialista do setor ferroviário	51
5.1.1	Síntese de estudos de casos relacionados a sensores inteligentes e monitoramento remoto para componentes da superestrutura ferroviária e métodos multicritérios	69
5.1.2	Demais Tecnologias da indústria 4.0 aplicáveis aos principais componentes da superestrutura ferroviária	77
5.2	Caracterização do Artefato - Sistema de Sensoriamento (Fase Gestão)	80
6	CONCLUSÃO.....	87
6.1	Limites e Limitações.....	88
6.1.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	88
	REFERÊNCIAS.....	90
	APÊNDICE A - Termo de consentimento livre e esclarecido para a realização da entrevista com os especialistas.....	103
	APÊNDICE B - Entrevista realizada com especialistas no setor ferroviário.....	105

1 INTRODUÇÃO

O modal ferroviário é o meio terrestre mais eficiente para o transporte de cargas e pessoas no mundo, seu surgimento representou uma grande evolução no transporte de grandes quantidades de materiais e em longa distância. Além destas características, este modal quando comparado ao rodoviário, por exemplo, traz em sua utilização a redução de congestionamentos, de acidentes de trânsito e dos impactos ao meio ambiente (PRATICÒ e FEDELE, 2023).

Este modal também é um grande vetor de crescimento econômico em todo mundo, pois aproxima cidades, estados e nações dos grandes centros produtivos e de distribuição de mercadorias. Nas últimas décadas, as ferrovias ao redor do mundo têm passado por modernizações e inovações tecnológicas, principalmente com o advento das tecnologias habilitadoras da indústria 4.0, e, atrelados a superestrutura ferroviária, aumentam a eficiência e a capacidade de transporte (LAITON-BONADIEZ, *et al*, 2022; ENSCO, INC. 2023).

A utilização das tecnologias da indústria 4.0 no modal ferroviário como, Big Data, Internet das Coisas (IoT), 5G, Impressão 3D, Sistema Ultrassônico de Falhas, Sensores Inteligentes e Monitoramento Remoto, entre outros, oferecem oportunidades de otimizar a logística ferroviária, bem como, a segurança das operações e o aumento da competitividade do setor frente ao modal rodoviário (JING, G, *et al*, 2021).

Assim, a utilização do modal ferroviário para transporte de cargas também é um instrumento de competitividade para empresas e governos, visto que, a busca por redução de custos e aumento dos resultados financeiros, envolve interesses dos gestores públicos e privados (FALCIOLA *et al*, 2020). No Brasil, as ferrovias ocupam apenas 17,7% da matriz de transporte, o que para um país com dimensões continentais (8.514.876 milhões de km²) torna-se insuficiente para atender as necessidades de escoamento das cargas, ficando a cargo do modal rodoviário com participação de 66,2% da matriz logística do país (EPL, 2021; IBGE, 2022; GLOBAL FIREPOWER, 2023).

Desta forma, compondo o cerne deste trabalho, o estado da Bahia, privilegiado por sua localização geográfica na costa brasileira, com uma extensão territorial de 564.760,429 mil km², 417 municípios divididos em 27 territórios de identidade e 7 regiões produtivas, será o *locus* da pesquisa no tocante às ferrovias e às tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 (SEI BAHIA, 2022; IBGE, 2022). Além disso, o estado tem uma economia diversificada, com destaque para setores como agricultura (sendo um dos maiores produtores nacionais de cacau, café, frutas, grãos e outros), pecuária, indústria, comércio, serviços, turismo, cervejaria, bebidas e a indústria de petróleo e gás, além disso, tem uma população estimada em 14.136.417 habitantes, segundo

dados do IBGE (2022).

No entanto, a tomada de decisões relacionadas ao modal ferroviário em conjunto com tecnologias da indústria 4.0 é uma tarefa complexa, envolvendo múltiplos fatores que variam desde os componentes da superestrutura (trilhos, os aparelhos de mudança de via, dormentes, lastro e os acessórios de fixação), até a localização dos hubs para integração entre os modais de transportes (RIBEIRO, 2018 e ANTT, 2021).

Neste sentido, este trabalho propõe a seguinte pergunta norteadora: **Como construir um modelo de apoio à decisão para projetos de implantação do modal ferroviário de cargas nos territórios de identidade do estado da Bahia, baseado nas tecnologias habilitadoras da indústria 4.0?**

Ademais, o estado da Bahia no tocante às ferrovias enfrenta desafios, como infraestrutura desatualizada e ineficiência operacional, assim, pesquisar sobre este assunto traz para o estado a possibilidade de conectar regiões produtivas aos grandes portos para o escoamento regional, nacional e internacional (SEI BAHIA, 2022). Com as tecnologias da indústria 4.0 não é diferente, pois a junção destas com as ferrovias visa trazer mais competitividade, modernização e melhorias no fluxo de cargas no estado (PRATICÒ e FEDELE 2023).

Desta forma, melhorar o sistema ferroviário contribui para a economia do estado, bem como para cadeia de suprimentos, isso ocorre porque o transporte por trens reduz a necessidade da utilização do rodoviário, aumenta a quantidade de cargas transportadas e integra com outros modais (PÉRA e CAIXETA-FILHO 2021). Assim, o estado da Bahia pode se beneficiar com a adoção das tecnologias no sistema ferroviário, uma vez que países mais desenvolvidos têm investido nesta relação de tecnologias integradas as ferrovias e alcançado benefícios, como a redução de custos de transporte, aumento na quantidade de cargas transportadas, redução no fluxo do modal rodoviário nas estradas, bem como, aumento da competitividade das empresas visto que, o escoamento da produção tende a ser mais eficiente com o advento das ferrovias (HÖRSTING e CLEOPHAS 2023).

1.1 Objetivos

Os objetivos deste trabalho trazem um norte para a pesquisa, os quais buscam não apenas compreender, mas também avançar em pesquisa no campo do transporte ferroviário de carga na Bahia, em sintonia com os avanços da indústria 4.0.

1.1.1 Objetivo Geral

Propor um modelo prescritivo baseado nas tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 aplicáveis a projetos de implantação de transporte ferroviário de carga no estado da Bahia.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar as principais tecnologias habilitadoras da indústria 4.0, com aderência ao transporte ferroviário de cargas;
- Analisar a percepção de especialistas sobre o uso de tecnologias da indústria 4.0 aplicáveis aos componentes da superestrutura ferroviária;
- Construir um artefato adaptável com informações para suporte à tomada de decisão que envolva componentes ferroviários e tecnologias da indústria 4.0.

1.2 Organização do Documento

Esta pesquisa está dividida em cinco capítulos. O capítulo 2 que trata da revisão da literatura, aborda um breve panorama histórico do transporte ferroviário, seguido por uma visão geral das ferrovias no Brasil, os marcos legais do setor ferroviário, infraestrutura e superestrutura ferroviária para transporte de cargas, tipos de trens, tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 no transporte ferroviário de cargas, competitividade, tomada de decisão, métodos de multicritério para tomada de decisão, métodos de localização para tomada de decisão. O capítulo 3 trata do arranjo espacial e econômico do estado da Bahia com o modal ferroviário de cargas. O capítulo 4 trata dos materiais e métodos utilizados no trabalho, o capítulo 5 traz os resultados e discussões sobre o artefato criado e suas implicações, o capítulo 6 traz as considerações, em seguida vêm as referências utilizadas e os apêndices.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados o modal ferroviário e suas características, as tecnologias habilitadoras da indústria 4.0, competitividade, métodos para tomada de decisão, e o arranjo espacial e econômico do estado da Bahia com o modal ferroviário de cargas.

2.1 Breve panorama histórico do transporte ferroviário

Transportar cargas em quantidades e com eficiência sempre foi um desafio para pessoas e empresas. As grandes cidades estão passando por transformações como por exemplo, com o aumento da densidade demográfica, congestionamento e a necessidade de melhoria em sua infraestrutura viária, assim, decidir qual o modo de transporte ideal para cada carga é um fator preponderante na logística e no atendimento aos pedidos (HÖRSTING e CLEOPHAS 2023). Desta forma, a decisão por transportar grandes quantidades de cargas de uma única vez recai na escolha do modal que se adeque a esta necessidade, assim, o transporte ferroviário de cargas surgiu para suprir a lacuna entre quantidade a ser transportada e a eficiência decorrente disso (PRATICÒ e FEDELE 2023).

As ferrovias se tornaram um marco importante no desenvolvimento da economia global, pois permitiu o transporte eficiente de mercadorias e pessoas, proporcionando uma nova forma de mobilidade. A construção das ferrovias exigiu grandes investimentos em infraestrutura, com a construção de pontes e túneis, implantação de estações e terminais, bem como sua manutenção (PINEDA-JARAMILLO 2023). Um dos grandes benefícios das ferrovias para a humanidade é a ligação entre as cidades, estados e países, bem como, a melhoria na resposta aos pedidos, principalmente quando existem integrações com outros meios de transporte, como o rodoviário (HÖRSTING e CLEOPHAS 2023).

O crescimento populacional e as revoluções industriais impulsionaram a necessidade de mudança em diversos aspectos, como por exemplo, no desenvolvimento do transporte por ferrovias. Sendo a Europa e os Estados Unidos pioneiros na implantação do transporte ferroviário (TISCHER, 2018; CICCARELLI, GIUNTINI e GROOTE, 2021; FORD, KWUN e VAN FLEET, 2023).

No primeiro momento de sua implantação, as ferrovias foram utilizadas para transporte de pessoas, em seguida visando reduzir os custos com transporte e aumentar a quantidade de cargas transportadas de uma única vez, os trens foram utilizados também para esta finalidade (TISCHER, 2018; CICCARELLI, GIUNTINI e GROOTE, 2021; FORD, KWUN e VAN

FLEET, 2023). A partir disso, houve um crescimento tanto do comércio entre cidades e países quanto do turismo.

A Inglaterra foi a pioneira mundial na implantação de ferrovia, em setembro de 1825 inaugurou a linha Stockton-Darlington, assim, a era das ferrovias estava iniciada (CICCARELLI, GIUNTINI e GROOTE, 2021). Os Estados Unidos, por sua vez passou a transportar pessoas e cargas com duas companhias (*Pacific Railway* e Santa Fé) entre 1860 e 1890 (SEDGWICK, 2021).

Com o passar dos anos, as ferrovias ganharam incrementos em tecnologia, capacidade de carga e velocidade (CROZET 2017; PRATICÒ e FEDELE 2023). Assim, os mesmos autores afirmam que a partir da década de 1960 os trens passaram por transformações e o Japão em 1964 foi a nação pioneira na construção e operação de trens de alta velocidade (*High-Speed Rail* (HSR)), operando a 210 km/h ligando a central de Tóquio a Shin Osaka.

Na Europa, o primeiro trem de alta velocidade foi apresentado em 1981 o que de acordo com Leboeuf (2016) e Praticò e Fedele (2023), possuía uma velocidade de 260 km/h. A Itália e a Alemanha desenvolveram em 1988 trens de alta velocidade, seguidas por Estados Unidos, Espanha, Bélgica, Reino Unido, Coreia do Sul, Taiwan, China, Holanda e Turquia entre 1992 e 2009, sendo que a partir daí mais desenvolvimento deste modal vem sendo implementados, principalmente em termos de velocidade, carga, pessoas e sustentabilidade (LEBOEUF 2016; CROZET 2017; PRATICÒ e FEDELE 2023).

As ferrovias fornecem para os países (e suas indústrias) uma flexibilidade importante tanto para escoamento da produção industrial, transporte de pessoas e é vital em tempos de guerra, pois servem para mobilizar o aparato militar com equipamentos pesados e suprimentos em geral. De acordo com o site The Business Research Company (<https://www.thebusinessresearchcompany.com/>), especializado em inteligência de mercado, o setor ferroviário global gerou no ano de 2022 uma receita de US\$ 505,41 bilhões, sendo que no ano de 2023 no primeiro semestre já chegou a US\$ 538,55 bilhões, envolvendo assim o transporte de carga e pessoas no mundo. Este volume financeiro demonstra a importância do setor para o contexto econômico global (GLOBAL FIREPOWER, 2023).

Desta forma, o país com a maior malha ferroviária em operação no mundo até o ano de 2023 é os Estados Unidos com 293.564 km de ferrovias, em seguida vem a China com 131.000 km, o Brasil vem em 9º lugar com 29.850 km, segundo dados do Global Firepower (2023) que é um site especializado em dados relativos às 145 potências militares modernas. Na tabela 1,

consta o ranking dos dez países com as maiores malhas ferroviárias em funcionamento até o ano de 2023.

Tabela 1: Ranking de países x Km de ferrovias

Ranking	Países	Km de ferrovias	Extensão territorial	
			Km ²	PIB US\$
1º	Estados Unidos	293.564	9.834.000	26,3 tri
2º	China	131.000	9.597.000	17,7 tri
3º	Rússia	87.157	17.100.000	1,5 tri
4º	Canadá	77.932	9.970.610	2,1 tri
5º	Índia	68.525	3.287.000	2,8 tri
6º	Argentina	36.917	2.780.400	450 bi
7º	Alemanha	33.590	357.588	4,2 tri
8º	Austrália	33.343	7.688.000	1,6 tri
9º	Brasil	29.850	8.514.876	9,9 tri
10º	França	29.640	551.695	2,9 tri

Fonte: Adaptado de Global Firepower (2023).

Embora o Brasil esteja em penúltimo lugar neste ranking para malha ferroviária, o mesmo não acontece quando analisamos o PIB, neste caso, o Brasil é o terceiro colocado. A partir dos dados na tabela 1, vale ressaltar que os principais produtos transportados por ferrovias são: produtos agrícolas, veículos e peças, materiais de construção, carvão, produtos químicos, alimentos, metais, minerais e papel. Desta forma, torna-se estratégico para as empresas e nações a utilização do modal ferroviário como forma de transportar grandes quantidades de cargas e pessoas evitando assim os grandes congestionamentos das cidades ao redor do mundo (HÖRSTING e CLEOPHAS 2023).

2.2 Transporte ferroviário de cargas no Brasil

O Brasil é um país com dimensões continentais, haja vista seus 8.515.759 milhões de km² de área, (IBGE, 2022). Assim, integrar os estados e cidades é uma tarefa desafiadora para as empresas e governos. No que diz respeito a logística de transporte, esta é um grande desafio para empresas e nações, visto que, coletar e entregar itens diversos no tempo certo e nas quantidades requeridas dentro de um prazo estabelecido é a fronteira entre o nível de serviço e a satisfação do cliente (PÉRA e CAIXETA-FILHO 2021).

Tanto as coletas quanto às entregas necessitam de uma combinação correta com a malha logística local, como por exemplo, se o trajeto será feito apenas por um modal, ou se haverá a integração. Assim, no Brasil, a partir da década de 1950, o transporte rodoviário começou a

ganhar destaque, principalmente devido aos investimentos para construção de estradas e rodovias, o mesmo não ocorreu com as ferrovias (DE CASTRO ALVES; DA SILVA RAMOS; SILVA, 2020).

Neste sentido, existe uma predominância do modal rodoviário no Brasil, o que ficou mais evidente na greve de 2018, que conforme Dantas e Fraga (2021) neste período o país passou por uma escassez de diversos produtos, justamente por causa da grande mobilização nacional dos caminhoneiros. Muito embora o Brasil utilize outros modais, como o aéreo, aquaviário (fluvial, lacustre e marítimo), dutoviário e ferroviário, a dependência maior é pelo rodoviário.

No tocante às ferrovias, seu início no Brasil foi a partir de 1854, conforme (DE CASTRO ALVES; DA SILVA RAMOS; SILVA, 2020). Desta forma, a primeira ferrovia foi inaugurada neste período com uma extensão de 14 km, chamada de Estrada de Ferro Mauá, situada no Rio de Janeiro, colaborando para o processo de industrialização do país (DOS SANTOS et al., 2018; IPHAN, 2022). Após a construção da Ferrovia Mauá, outras ferrovias foram construídas em diferentes partes do país, impulsionando a economia e a integração nacional, principalmente durante o século XIX e a primeira metade do século XX (IPHAN, 2022).

Outra ferrovia importante foi a Estrada de Ferro Santos-Jundiaí, inaugurada em 1867, com o objetivo de conectar o Porto de Santos, importante centro exportador, à cidade de Jundiaí, no estado de São Paulo, sendo um marco no desenvolvimento da região e crescimento econômico para o estado de São Paulo (IPHAN, 2022).

Durante o século XX, o Brasil cresceu em ferrovias, especialmente para o transporte de *commodities* como minério de ferro, grãos e produtos agrícolas. De acordo com o IPHAN (2022), foi criada no Brasil pelo governo federal a Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA) no ano de 1957, com o objetivo de unificar e administrar as diversas ferrovias existentes no país.

O Brasil chegou a ter em 1960, cerca de 38.000km de ferrovias, apesar disso, em se tratando de infraestrutura logística, os investimentos foram canalizados para as rodovias (DE CASTRO ALVES; DA SILVA RAMOS; SILVA, 2020). Quando comparado com países como Índia, EUA, China, Canadá e Rússia, por exemplo, o Brasil tem um longo caminho a percorrer e isso passa por investimentos públicos e privados. A ANTF (Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários) relata que:

Para se ter uma ideia da importância das ferrovias na logística, em 2021 mais de 93% do minério de ferro exportado chegou aos portos brasileiros por trilhos. O modo ferroviário responde pelo transporte de mais de 49% dos grãos sólidos agrícolas exportados e, no caso do açúcar, esse índice é de quase 53%; no de milho, 58%, e no

complexo de soja (soja e farelo) as ferrovias transportaram mais de 46% do volume exportado (ANTF,2021).

Dados do PNL 2020 (Plano Nacional de Logística) tendo como referência o ano de 2017, apontam que as ferrovias aqui no Brasil representam apenas 17,69% da matriz de transporte de carga, enquanto o modal rodoviário tem um percentual de 66,21% da matriz de transporte, na tabela 2, fica claro o quanto essa matriz necessita de uma redistribuição (EPL, 2021).

Tabela 2: Matriz de transportes brasileira

Modo de transporte	Ano base dos dados 2017	
	*TKU (bilhões)	% da matriz
Rodoviário	1.549,84	66,21%
Ferroviário	414,13	17,69%
Cabotagem costeira	215,49	9,21%
Navegação em vias interiores	130,61	5,58%
Dutoviário	29,56	1,26%
Aeroviário	1,33	0,06%
Total	2.340,96	100%

Fonte: Adaptado de EPL (2021).

*TKU - Tonelada por Quilômetro Útil.

Não só a redistribuição da matriz de transporte, mas também o investimento em infraestrutura são fatores fundamentais para o desenvolvimento de novas rotas e principalmente geração de empregos e riquezas para as empresas e o país (ANTF, 2021).

2.3 Marcos legais das ferrovias

A melhoria da infraestrutura de transportes no país passa por regulamentações governamentais. Desta forma, no Brasil, a primeira ferrovia foi inaugurada em 1854, amparada pela Lei de 29 de agosto de 1828 (Lei José Clemente), que autorizava a outorga, à iniciativa privada, de obras de infraestrutura no país, e, mais especificamente, pelo Decreto nº 101, de 31 de outubro de 1835 (Decreto Feijó), que autorizava a concessão de ferrovias (BRASIL, 2022).

Entretanto, a partir do século XX, toda infraestrutura ferroviária no país passou a ser controlada por empresas estatais, com predominância da Rede ferroviária Federal Sociedade Anônima (RFFSA) que no início da década de 1990 foi dissolvida e a malha existente foi repartida em várias concessões com contratos particulares (BRASIL, 2022). No ano de 2001, foi editada a lei nº 10.233 contendo as regras básicas para a gestão das ferrovias brasileiras que incluía ainda as concessões.

Melo Filho (2022) relata que a partir da lei nº 10.233, foi possível além das regulamentações dos setores aquaviário e terrestre a criação de agências regulamentadoras como a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) e a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). O autor afirma ainda que:

Passado algum tempo, alteraram-se os fundamentos do marco regulatório do setor (Lei nº 10.233, de 5 de junho de 2001), com a edição da Lei nº 12.743, de 19 de dezembro de 2012, por meio da qual se tomou possível a possibilidade de outorga da operação do transporte ferroviário de cargas não associado à exploração da infraestrutura ferroviária a Operador Ferroviário Independente (OFI). E, posteriormente, foi instituída a política de livre acesso ao Subsistema Ferroviário Federal, por força do Decreto nº 8.129, de 23 de outubro de 2013, revogado pelo Decreto n. 8.875, de 2016. Nada obstante os esforços realizados, nenhum leilão de trecho ferroviário foi realizado no período (MELO FILHO, 2022).

O ano de 2021 foi marcado por mais um passo importante no segmento ferroviário no Brasil, com a aprovação da Medida Provisória nº 1.065, de 30 de agosto de 2021 dando origem a um novo marco para este setor, com a possibilidade de outorga por autorização, como já era possível nos âmbitos portuário e aeroportuário. Desta forma, quando comparada a uma concessão ou mesmo a uma permissão, nos moldes do que prescrevem as leis brasileiras aplicáveis, a autorização ocorre por meio de um instrumento contratual mais simples, ao passo em que o particular interessado assume maior risco pelo empreendimento (BRASIL, 2022).

As autorizações ferroviárias podem ser outorgadas por dois caminhos: pelo requerimento do interessado, a ser analisado pela autoridade competente; ou pelo chamamento, em processo de iniciativa do Poder Executivo, em que se oferta a exploração de ferrovias planejadas, mas não implantadas, ou mesmo que tenham baixa ou nenhuma operação. Outra inovação foi a previsão expressa de autorregulação, que possibilita aos autorizatários associarem-se para constituir uma entidade com esse fim, submetida à supervisão da agência reguladora, no caso, a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). BRASIL, 2022.

MELO FILHO (2022) relata as principais inovações do marco regulatório das ferrovias constam no Art. 43 e no (Capítulo VII - Da autorregulação ferroviária). O Art. 43, trata que:

As entidades vinculadas ao Ministério da Infraestrutura poderão apoiar as seguintes atividades de exploração de ferrovias em regime de autorização, sem prejuízo de outras que lhe sejam atribuídas pelo Ministério:

- I - análise dos requerimentos de autorização;
- II - elaboração de estudos para subsidiar os chamamentos públicos, incluída a priorização de trechos, pesquisas e prospecções de mercado;
- III - fiscalização das autorizatárias;
- IV - supervisão dos compromissos de investimento em malhas de interesse da administração pública, decorrentes da devolução ou desativação de trechos ferroviários ou da adaptação de contrato de concessão para autorização;
- V - gestão do patrimônio público ferroviário; e
- VI - obtenção de licenças ambientais. (BRASIL, 2022).

O Capítulo VII no Art. 37 traz informações sobre a autorregulação da seguinte forma:

Art. 37. As administradoras ferroviárias e os operadores ferroviários independentes ficam sujeitos à regulação e à fiscalização da ANTT.

§ 1º A ANTT estabelecerá normas de trânsito e transporte ferroviários que disponham sobre, entre outros assuntos:

I - o uso de sinais sonoros, como buzinas e sinos;

II - formas de proteção nos vagões;

III - a velocidade dos trens; e

IV - o tamanho da composição ferroviária. (BRASIL, 2022).

Assim, Melo Filho (2022) incrementa que tanto o Projeto de Lei do Senado 261/2018 relacionado ao Marco Legal das Ferrovias, quanto a edição da Medida Provisória nº 1.065, de 2021, originaram a atual Lei das Ferrovias nº 14.273, de 23 de dezembro de 2021. Desta forma, o autor destaca ainda que:

O texto final da Lei nº 14.273, de 23 de dezembro de 2021, agrega novos instrumentos e estratégias de viés responsivo ao setor, já há muito pleiteados pelos diversos segmentos interessados. Muito embora represente uma complementação necessária e positiva em termos de evolução e consolidação da política regulatória, deixa de avançar na oportunidade de agregação de atores não estatais ao processo regulatório, além de deixar de incluir em algumas ocasiões a figura do operador ferroviário independente ou, nos dizeres da nova lei, dos transportadores desvinculados da gestão da infraestrutura (MELO FILHO, 2022, p. 17).

Assim, relevantes benefícios com a Lei nº 14.273, de 2021, foram trazidos para este setor, como por exemplo, a renovação antecipada de concessões, proporcionando maior segurança jurídica e estímulo para mais investimentos; a postergação do prazo para a construção de ferrovias, o que permitirá maior tempo para cumprimento dos requisitos; a maleabilidade das obrigações contratuais, que visa facilitar a adaptação às mudanças mercadológicas; impulsiona à competição, o que permite a entrada de novas empresas; incentivos fiscais e redução de impostos; e a melhora na regulação e governança, para atingir a transparência e eficiência na gestão das concessões (MELO FILHO, 2022 e BRASIL, 2022).

Ademais, além dos benefícios citados, a Lei nº 14.273, de 2021, tem como principais vertentes o impulsionamento para o desenvolvimento e modernização do setor ferroviário nacional para que este se torne mais eficiente e principalmente competitivo frente aos outros modais de transporte.

2.4 Infraestrutura e superestrutura ferroviária para transporte de cargas

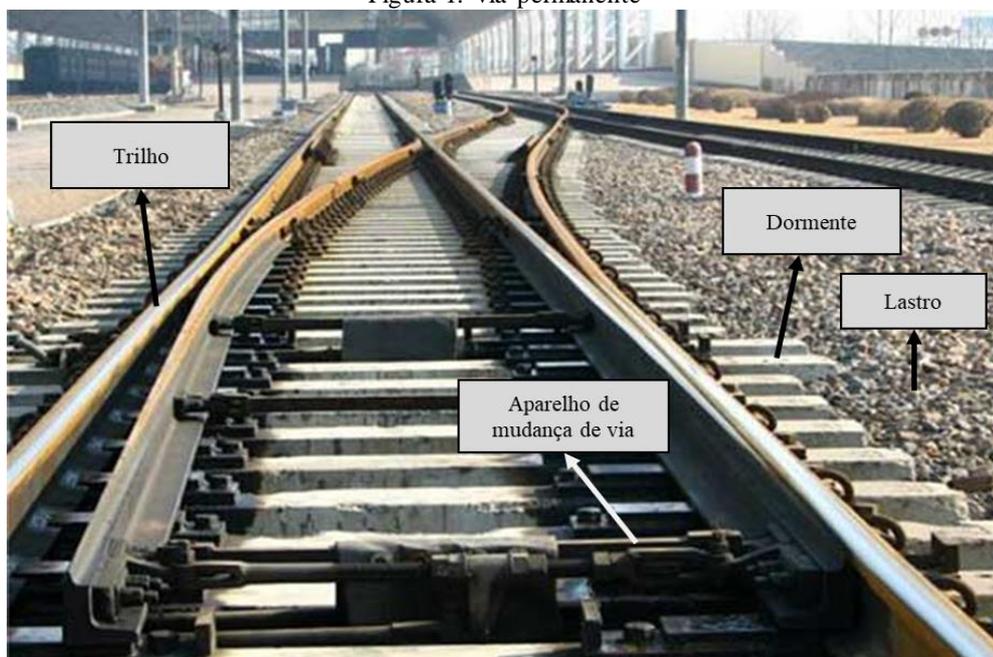
Uma ferrovia tem como principal função conduzir de maneira segura os trens, buscando reduzir a fricção entre as rodas e os trilhos, suportando os esforços provenientes das movimentações com a finalidade de gerar eficiência e economia para o modal ferroviário

(RIBEIRO, 2018). A ANTT (2021) define a ferrovia como um sistema de transporte terrestre, autoguiado, em que os veículos (motores e rebocados) se deslocam com rodas metálicas sobre duas vigas contínuas longitudinais, também metálicas, denominadas trilhos.

Assim, a infraestrutura ferroviária está diretamente ligada ao conjunto de obras composta por: terraplenagem (cortes e aterros), sistemas de drenagem superficial e profundo, obras de arte correntes e especiais (pontilhões, pontes e viadutos) e túneis (RIBEIRO, 2018 e ANTT, 2021).

Após a infraestrutura, vem a superestrutura, conforme figura 1, que é o sistema de via permanente, composta por trilhos, os aparelhos de mudança de via, dormentes, lastro e os acessórios de fixação (figura 2). Todos estão sujeitos às intempéries da natureza e a degradação provocadas pela circulação dos veículos e outros materiais rodantes (ANTT, 2021).

Figura 1: Via permanente



Fonte: Adaptado de SINCHOLDRAIL.ORG (2023).

O trilho é a peça principal da superestrutura ferroviária e é feito de aço, o qual fornece uma superfície para o material rodante, desta forma, desempenham um papel fundamental na definição do conceito de bitola, que se refere à distância entre os trilhos. Os três tipos de bitola utilizadas no Brasil é a mista, a métrica e a larga e possuem as seguintes dimensões: métrica tem largura de 1m entre os trilhos; bitola larga com 1,6m de largura entre os trilhos e a mista que comporta os dois formatos a métrica e a larga (RUMO, 2023). Existe ainda o padrão internacional que possui 1,435m de largura. No Brasil, o percentual de utilização de bitola

métrica é de 74,3% nas ferrovias nacionais, a bitola larga representa 23,9% de participação nas ferrovias e a mista com 1,8% de utilização, segundo dados da ANTT, 2021.

O aparelho de mudança de via, por sua vez, é o responsável por realizar os desvios dos trens para outras linhas/rotas. Os dormentes são blocos de madeira, concreto ou materiais compostos que são colocados sob os trilhos para fornecer suporte e fixação. O lastro é uma camada de pedras ou cascalho que fica sob os dormentes e ao redor dos trilhos, tem como função fornecer suporte, drenagem e estabilidade para a via férrea (ANTT, 2021; SINCHOLDRAIL.ORG, 2023).

A via permanente ferroviária, é espinha dorsal do sistema de transporte sobre trilhos, para sua perfeita operação necessita dos acessórios de fixação, demonstrados na figura 2, os quais são responsáveis por sustentar os elementos da superestrutura e garantir a segurança das operações.

Figura 2: Acessórios de fixação em ferrovias



Fonte: Adaptado de SINCHOLDRAIL.ORG (2023).

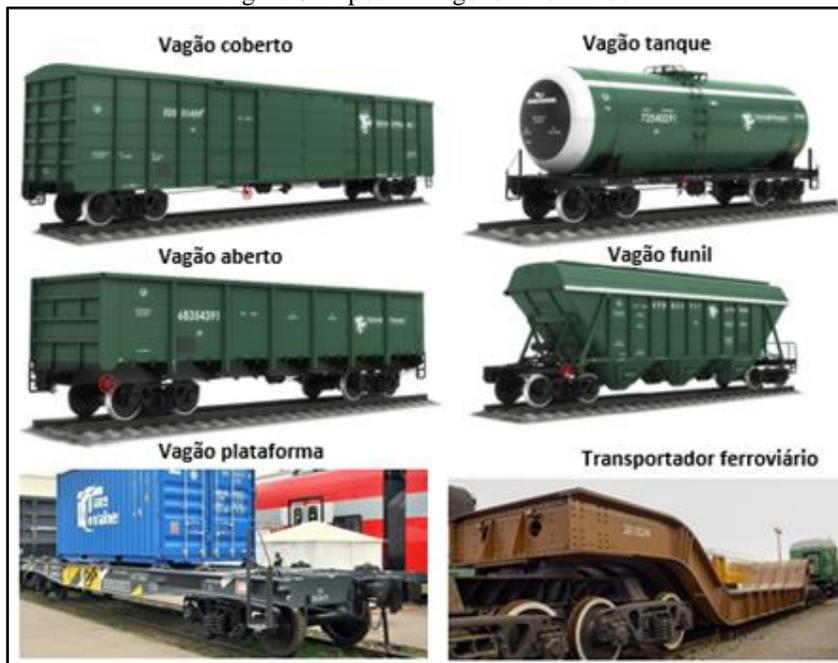
Além dos componentes citados, a via permanente inclui outros elementos, tais como: sistemas de sinalização, eletrificação para trens elétricos e sistemas de segurança, como cercas e passagens de nível.

2.4.1 Tipos de trens

O modal ferroviário tem em seu complexo operacional a infraestrutura, superestrutura (tratados no item anterior 2.4) os tipos de vagões ferroviários (coberto, aberto, plataforma,

tanque, funil e transportador ferroviário). Na figura 3 constam seis tipos de vagões ferroviários, estes são responsáveis por transportar grandes quantidades de produtos/commodities, integrando fábricas, fornecedores e centros de distribuição na cadeia logística, para que o atendimento aos pedidos tenha efetividade.

Figura 3: Tipos de vagões ferroviários.



Fonte: Adaptado de LANEMAX (2019).

Estes vagões transportam os seguintes materiais, conforme LANEMAX, 2019:

- vagões cobertos: produtos eletrônicos, alimentos embalados, papel, móveis etc.;
- vagões abertos: minério de ferro, carvão, madeira, produtos agrícolas a granel, sucata metálica, areia etc.;
- plataformas: veículos, grandes tubos, equipamentos industriais etc.;
- tanques: petróleo, produtos químicos líquidos, combustíveis etc.;
- funil: grãos, minerais a granel, minério, carvão etc. seu formato facilita o descarregamento das cargas;
- transportador ferroviário: especializado para cargas pesadas e superdimensionadas, como, transformadores, geradores, colunas, prensas, turbinas, rotores etc.

Assim, os vagões são puxados ou empurrados por uma ou mais locomotivas figura 4, as quais podem ser a vapor, a diesel e elétrica, transportando os mais variados tipos de materiais ao redor do mundo formando o transporte ferroviário de cargas, garantindo uma maior quantidade de carga transportada de uma única vez (ANTT, 2021).

Figura 4: Tipos de locomotivas.



Fonte: Adaptado de BRASIL, 2021, ANTT, 2022 e AGÊNCIA INFRA, 2022.

Atualmente, as locomotivas modernas são equipadas com sistemas avançados de tração, controle e segurança, permitindo transporte ferroviário mais eficiente e confiável gerando integração na cadeia logística (BRASIL, 2021, ANTT, 2022 e AGÊNCIA INFRA, 2022).

2.5 Tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 no transporte ferroviário de cargas

As tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 têm origem/evoluíram a partir da primeira, segunda e terceira revolução industrial, com diferentes transformações tecnológicas, econômicas e sociais, conforme tabela 3, representando mudanças significativas na forma como a produção e os processos industriais foram e são conduzidos.

Tabela 3: Revoluções industriais

Revoluções Industriais	Principais características
1ª Revolução Industrial	Máquina e energia a vapor para impulsionar a produção industrial; desenvolvimento da indústria têxtil e a mecanização dos processos de tecelagem; aumento da produção em massa e da eficiência na agricultura e na manufatura; urbanização acelerada.
2ª Revolução Industrial	Avanços tecnológicos significativos, como eletricidade, aço e produtos químicos; desenvolvimento da produção em massa e da linha de montagem; crescimento do setor de transportes, com a invenção de automóveis, aviões e trens; expansão da indústria pesada, como siderurgia e petroquímica; aumento da urbanização e migração para as cidades.
3ª Revolução Industrial	Automatização dos processos de produção com o uso de eletrônica e tecnologia da informação e telecomunicações; início da era da informação, com o advento da

internet e a digitalização de dados; crescimento da indústria de serviços e do setor de tecnologia; expansão do comércio global e da cadeia de suprimentos; surgimento de startups e empresas de tecnologia inovadoras.

4ª Revolução Industrial	Fusão de tecnologias digitais, físicas e biológicas; avanços na inteligência artificial, robótica, internet das coisas (IoT) e automação; desenvolvimento de tecnologias disruptivas, como impressão 3D e veículos autônomos; ênfase na personalização e na produção sob demanda; expansão da economia digital e da economia compartilhada; transformação nos setores de trabalho, com ênfase em habilidades digitais e colaboração homem-máquina.
-------------------------	--

Fonte: Adaptado de SANTOS *et al*, 2018; PACCHINI *et al*, 2019 e LAITON-BONADIEZ *et al*, 2022.

Desta forma, a Indústria 4.0, também conhecida como a 4ª Revolução Industrial, refere-se às tecnologias inteligentes que são implementadas nas indústrias e que são capazes de se comunicar autonomamente ao longo de toda a cadeia de valor (SANTOS *et al*, 2018). Essas tecnologias incluem, análise, tratamento e compartilhamento de dados, rastreabilidade, simulação de processos, comunicação e aprendizado entre máquinas, dentre outras (LAITON-BONADIEZ *et al*, 2022). Na tabela 4, constam as principais tecnologias habilitadoras da indústria 4.0.

Tabela 4: Principais tecnologias habilitadoras da indústria 4.0.

Tecnologias	Descrição
Big Data	Estuda como tratar, analisar e obter informações a partir de grande quantidade de dados.
Computação na nuvem	Servidores em locais desconhecidos do usuário para armazenamento conectado à internet.
Internet das Coisas (IoT)	Objetos que podem receber ou enviar informações via internet e se conectar a outros objetos/máquinas.
Inteligência Artificial (IA)	Capacidade que soluções tecnológicas têm de simular a inteligência humana, com a realização de atividades de maneira autônoma e aprendendo por si mesma.
Machine to Machine (M2M)	Comunicação ou transferência de dados entre máquinas.
Realidade Aumentada	Sobreposição de objetos virtuais ao mundo real.
Realidade Virtual	Realidade provocada pelo uso de tecnologias que simulam o mundo virtual dentro do mundo real.
Segurança Cibernética	Proteção das redes de internet.
Simulação Computacional	Uso de softwares que, por meio de modelos matemáticos, permitem a realização de previsões de situações que podem ocorrer em uma determinada operação.
Tecnologias de localização	Tecnologia que permite a geolocalização utilizando a internet, radiofrequência, GPS etc.
Sensores inteligentes e monitoramento remoto	Os sensores conectados aos dispositivos, máquinas e outros, capturam dados e transmitem via internet, para análises e tomada de decisão.

Fonte: Adaptado de PACCHINI *et al*, 2019 e LAITON-BONADIEZ *et al*, 2022.

Além das principais tecnologias (citadas na tabela 4) fazem parte destas, elementos tecnológicos (“componente ou parte integrante de uma tecnologia”) (dispostos na tabela 5) que as complementam, gerando melhor aplicabilidade de acordo com cada necessidade. Esses elementos, em conjunto com as tecnologias, têm a capacidade de gerar ganhos para as organizações, incluindo o aumento de produtividade, a melhoria no nível de serviço ao cliente, redução de custos, entre outros (SACOMANO *et al*, 2018; PACCHINI *et al*, 2019 e LAITON-BONADIEZ *et al*, 2022).

Tabela 5: Elementos tecnológicos que complementam as tecnologias 4.0

Elementos tecnológicos	Conceitos
Código QR	Grande quantidade de dados armazenados e transmitidos, identificação de materiais, máquinas, entre outros.
Drone	Equipamento com sensores, motores, sistemas de comunicação, câmeras e outros componentes eletrônicos que lhe permitem capturar imagens, transmitir dados e executar diversas tarefas e aplicações.
Etiquetas RFID (Radio Frequency Identification)	Além da grande quantidade de dados armazenados e transmitidos, também gera rastreabilidade de produtos, veículos, máquinas, materiais diversos, entre outros.
Impressão 3D	Personalização de projetos, impressão de peças, produtos, equipamentos, redução de dependência de fornecedores, entre outras.
TMS (Transportation Management System)	Permite o gerenciamento eficiente e automatizado das operações logísticas, incluindo o planejamento, execução e controle do transporte de mercadorias, além de permitir a gestão de vagões e contêineres, rastreamento de cargas, gestão de inventário, agendamento de operações e otimização de recursos.

Fonte: Adaptado de: SACOMANO *et al*, 2018; PACCHINI *et al*, 2019 e LAITON-BONADIEZ *et al*, 2022.

Para o transporte ferroviário, essas tecnologias e elementos tecnológicos podem ser aplicadas em várias etapas, como o planejamento (simulação dos cenários para as linhas e o trânsito), a utilização de sensores e dispositivos conectados para o monitoramento em tempo real dos ativos ferroviários, o rastreamento dos trens e produtos transportados, a inspeção das condições da infraestrutura e superestrutura (tratadas no tópico 2.4), análise de grandes volumes de dados para otimizar operações e prever falhas, cálculo do tempo de carga e descarga, treinamento dos profissionais envolvidos nas diversas operações e conectividade entre os diferentes atores envolvidos, fazendo com que as operações ferroviárias sejam mais inteligentes, eficientes e competitiva.

2.6 Competitividade

Com a concorrência cada vez mais acirrada, as empresas em seus setores buscam competir por fatias de mercado para o alcance de seus objetivos, sendo assim, a competitividade

está diretamente relacionada à capacidade que uma empresa ou nação tem de se destacar, obter vantagens e superar os concorrentes em um determinado mercado, setor ou cenário econômico (FALCIOLA *et al*, 2020; PAKSOY *et al*, 2023).

Com as ferrovias não é diferente, comparativamente, enquanto o modal rodoviário é reconhecido pela sua flexibilidade atuando do ponto de origem ao destino, o modal ferroviário se destaca pela sua capacidade de transporte em larga escala, por outro lado, o modal ferroviário muitas vezes carece de flexibilidade de rota e acessibilidade direta aos locais de origem e destino o que pode limitar sua competitividade em determinados contextos logísticos. Desta forma, sugere que as empresas levem em consideração na escolha do modal, fatores como distância, volume de carga, tempo de trânsito, custo logístico e prazo de entrega, buscando atender aos anseios dos clientes (GRUETZMACHER, VAZ, FERREIRA, 2022).

Para o alcance da competitividade, de acordo com Falciola *et al*, 2020, as empresas precisam:

Ser capaz de atender à demanda dos consumidores – em termos de quantidade, qualidade, preço e prazo de entrega – em seu segmento de mercado-alvo, em qualquer momento; ser capaz de fazê-lo de forma sustentável, ou seja, ao longo do tempo e, assim, ajustar-se às mudanças em seu ambiente; estar constantemente conectado às últimas informações relevantes do mercado (FALCIOLA *et al*, 2020, p. 2).

Entender sobre seu segmento de atuação é fundamental para manter-se no mercado, haja vista que é necessário identificar as áreas de melhoria, investir em inovação, adotar melhores práticas de gestão e se adaptar às demandas do mercado em constante evolução, desta forma, as organizações necessitam pensar no curto, médio e longo prazo em como se manterem competitivas em relação aos seus concorrentes. A competitividade pode ser alcançada por diversos fatores, conforme (O'CONNOR *et al*, 2018; FALCIOLA *et al*, 2020; PAKSOY *et al*, 2023):

- Eficiência produtiva: capacidade de produzir bens e serviços de forma mais eficiente, com redução de custos e aumento de lucratividade;
- Qualidade dos produtos e serviços que atendam ou superem as expectativas dos clientes;
- Inovação: habilidade de desenvolver novos produtos, processos, tecnologias e serviços que tragam melhorias significativas ou disruptiva em relação aos concorrentes;
- Flexibilidade: adaptabilidade às mudanças mercadológicas, tecnológicas e nas preferências dos consumidores;
- Capital humano: contar com colaboradores capacitados para desempenhar suas funções de maneira eficiente;

- Acesso a recursos: matérias-primas, infraestrutura e recursos financeiros de forma mais eficiente;
- Políticas governamentais: entender o ambiente regulatório e as políticas governamentais para alcançar a competitividade.

O entendimento destes fatores é de fundamental importância para o alcance de vantagem competitiva, a qual pode ser entendida como às características ou recursos exclusivos de uma empresa que a torna superior aos seus concorrentes em um determinado mercado ou setor (PORTER e HEPPELMANN, 2014). Os mesmos autores, afirmam ainda que a vantagem competitiva pode ser alcançada por três caminhos, a saber:

- Diferenciação de produto ou serviço: oferta de produtos/serviços únicos ou com características distintas em comparação aos concorrentes, o que pode levar os clientes a preferirem a empresa por essas características exclusivas.
- Liderança no custo: ser capaz de produzir e oferecer produtos/serviços a um custo mais baixo do que os concorrentes, permitindo à empresa praticar preços mais competitivos ou obter maiores margens de lucro.
- Enfoque: a organização deve concentrar-se em um segmento específico do mercado e atender às necessidades desse nicho de forma mais eficiente do que empresas que buscam abranger um mercado mais amplo, escolhendo para isso a estratégia mais adequada ao seu produto/serviço.

A diferenciação, liderança no custo quanto o enfoque, podem ser utilizadas por empresas de diversos segmentos, como exemplo, o setor de ferrovias, por se tratar de um modal que tem como principais características o volume, peso e a quantidade de cargas transportadas de uma única vez, o alcance de vantagem competitiva frente aos outros modais é evidenciado observando essas características, levando em consideração ainda além do custo, o menor consumo de energia e a redução das emissões de poluentes em comparação com outros modos de transporte, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e a preservação do meio ambiente (GRUETZMACHER, VAZ, FERREIRA, 2022). Desta forma, ser competitivo no mercado e obter vantagem competitiva frente aos concorrentes requer análises detalhadas de todos os aspectos tratados neste tópico, para uma melhor tomada de decisão.

Em um cenário cada vez mais competitivo e tecnológico, a integração entre o setor ferroviário e os avanços da indústria 4.0 emerge como um elemento-chave para a otimização da logística e o aumento da competitividade. A adoção de tecnologias habilitadoras, como Internet das Coisas (IoT), Big Data, Inteligência Artificial, Sensores Inteligentes e

Monitoramento Remoto, possibilitam não apenas aprimorar a eficiência operacional do modal ferroviário, mas também transformar todo o ecossistema logístico, desde o planejamento e gestão de rotas até a manutenção preditiva de infraestrutura e equipamentos. Além disso, a interconectividade proporcionada pelas tecnologias da indústria 4.0 podem permitir uma maior integração entre os diferentes modais de transporte, promovendo uma cadeia logística mais eficiente (PACCHINI *et al*, 2019; LAITON-BONADIEZ *et al*, 2022 e PAKSOY *et al*, 2023).

2.6.1 Tomada de decisão

Com o mercado cada vez mais competitivo, a tomada de decisão nas empresas tende a ser um processo crítico que envolve a identificação das melhores estratégias de negócios, gestão de recursos humanos, marketing, finanças, operações logísticas, entre outras, para alcançar os objetivos e metas (ROMAN, OSINSKI e SELIG, 2016; RAMOS e FERNANDES, 2023). Outrossim, o processo decisório é uma atividade que envolve a busca e a seleção de uma ação adequada para atingir um objetivo, e que a eficácia das decisões organizacionais é frequentemente influenciada pela intuição e experiência dos líderes. Neste sentido, além da coleta de dados é necessário a experiência de quem tomará as decisões para que os resultados sejam satisfatórios.

No quadro 1, constam quatro etapas de um processo decisório as quais denotam a importância de coletar informações, desenvolver alternativas, escolher a melhor alternativa, tomar a decisão e monitorar de modo que a empresa alcance seus objetivos.

Quadro 1: Etapas do processo decisório

Etapas	Características
Inteligência: Existe algum problema?	Coleta de informações sobre o que precisa ser decidido, bem como, informações gerenciais que auxiliam na tomada de decisão.
Concepção: Quais alternativas?	Criação, desenvolvimento, análise de possíveis ações e alternativas disponíveis para a tomada de decisão.
Escolha: Qual alternativa escolher?	Decisão de qual alternativa será escolhida, bem como, as consequências e possíveis custos.
Implementação: Qual o resultado da escolha? Funcionou?	A partir da escolha da alternativa, nesta fase é o momento de implementar e monitorar para ter a certeza que ocorreu conforme escolha.

Fonte: Adaptado de Hansel, Bertolini e Ribeiro (2022).

No dia a dia das empresas, estas etapas não necessariamente são seguidas rigorosamente ou na sequência que aparece no quadro acima, visto que a tomada de decisão como afirmam Hansel, Bertolini e Ribeiro (2022) podem acontecer incluindo a experiência do tomador e cada etapa tem suas peculiaridades e complexidade, pois numa tomada de decisão a alternativa escolhida para aquele momento pode não ser a mais satisfatória e sim a razoavelmente aceitável.

A partir das etapas e características citadas no quadro 1, Hansel, Bertolini e Ribeiro, (2022) classificam a tomada de decisão em dois blocos, as decisões programadas e as não programadas. Neste sentido, as decisões programadas são aquelas que seguem procedimentos, sendo rotineiras, possibilitando a sistematização para o alcance da eficiência organizacional. Já as decisões não programadas, remetem a não previsibilidade, pois geralmente envolvem situações novas e complexas, onde o tomador de decisão vai utilizar de suas experiências e informações disponíveis para decidir o que é melhor para sua empresa (HANSEL, BERTOLINI e RIBEIRO, 2022).

2.6.1.1 Métodos de multicritério para tomada de decisão

Os métodos para tomada de decisão de multicritério fornecem um conjunto valioso de técnicas que permitem aos gestores (ou tomadores de decisões) avaliar as opções sob diferentes perspectivas, envolvendo aspectos culturais, financeiros, estratégicos, entre outros, utilizando equações matemáticas, estatísticas múltiplas, teorias econômicas e programas computacionais, buscando a solução ótima para a tomada de decisão (TAHERDOOST e MADANCHIAN, 2023). Os principais métodos de multicritério estudados na literatura conforme (Diaz-Balteiro, González-Pachón e Romero, 2017; Bystrzanowska e Tobiszewski, 2018; Tian *et al*, 2023) estão descritos no quadro 2.

Quadro 2: Principais métodos multicritérios para tomada de decisão

Principais métodos para tomada de decisão	Descrição	Referências
Processo hierárquico analítico (AHP)	Metodologia voltada para solução de problemas de escolha (opção), aplicada para diversas situações em que existam estruturas complexas.	DIAZ-BALTEIRO, et al (2017); BYSTRZANOWSKA e TOBISZEWSKI (2018); PIMENTA, et al (2019); NERY (2022); DEVECI, SIMIC e TORKEYESH (2021); TAHERDOOST, et al (2023); TIAN, et al (2023).
Processo de rede analítica (ANP)	Método de tomada de decisão que se adapta a uma hierarquia recursiva não independente é um novo método prático de tomada de decisão baseado em AHP.	DIAZ-BALTEIRO, et al (2017); DEVECI, SIMIC e TORKEYESH (2021); TIAN, et al (2023);

Método melhor-pior (BWM)	Pode ser usado para comparar o desempenho de múltiplas alternativas quando elas são avaliadas sob diferentes critérios.	DEVECI, SIMIC e TORKA YESH (2021); PAMUCAR, et al (2021); KARL (2022); TIAN, et al (2023).
Tomada de decisão em grupo de múltiplos critérios (MCGDM)	A principal vantagem é a mudança de tomadores de decisão únicos para múltiplos.	KARL (2022); TIAN, et al (2023).
Técnica para ordenar preferência por similaridade com solução ideal (TOPSIS)	Método de classificação que se aproxima da solução ideal, a principal vantagem é que pode ser aplicado para tomada de decisão multiobjetivo com soluções contínuas.	DEVECI, SIMIC e TORKA YESH (2021); KARL (2022); TIAN, et al (2023).
Modelo de soma ponderada (WSM)	Meio comum de integração de resultados de avaliação, que permite combinar resultados de avaliações em que diferentes indicadores têm importâncias relativas distintas.	BYSTRZANOWSKA e TOBISZEWSKI (2018); DEVECI, SIMIC e TORKA YESH (2021); KARL (2022); TIAN, et al (2023).
Métodos para otimizar soluções de compromisso na tomada de decisões multiobjetivo (VIKOR)	Método para otimizar soluções de compromisso na tomada de decisões multiobjetivo, tem capacidade de chegar a uma solução que leve em conta todos os indicadores conflitantes.	BYSTRZANOWSKA e TOBISZEWSKI (2018); KARL (2022); TIAN, et al (2023).
Método de organização de classificação de preferência para avaliações de enriquecimento (PROMETHEE)	Método que fornece ao tomador de decisão uma classificação parcial e completa do conjunto de soluções de acordo com regras de decisão satisfatórias e ótimas.	BYSTRZANOWSKA e TOBISZEWSKI (2018); KARL (2022); TIAN, et al (2023).
Eliminação e escolha traduzindo a realidade (ELECTRE)	Método para resolver problemas de decisão multicritério com um número finito de candidatos.	BYSTRZANOWSKA e TOBISZEWSKI (2018); KARL (2022); TIAN, et al (2023).
Análise de utilidade multiatributo (MAUA)	Método abrangente de avaliação de múltiplos indicadores baseado na teoria da utilidade multiatributo.	BYSTRZANOWSKA e TOBISZEWSKI (2018); KARL (2022); TIAN, et al (2023).
Avaliação proporcional complexa (COPRAS)	Método para tomada de decisão multiatributo, que capta a importância e a utilidade dos indicadores de avaliação a serem combinados na avaliação de soluções.	BYSTRZANOWSKA e TOBISZEWSKI (2018); KARL (2022); TIAN, et al (2023).
Tecnologias baseadas em dados e Internet das Coisas (IoT)	Ferramentas importantes para o desenvolvimento de técnicas MCDM, cuja ideia central é a tomada de decisões e ações centradas em dados.	TIAN, et al (2023).

Fonte: Autoria própria (2023).

Os métodos de multicritério para tomada de decisão representam uma abordagem estratégica para lidar com decisões complexas, onde múltiplos fatores e critérios devem ser analisados. Estes métodos permitem análises estruturadas e considerações ponderadas em diferentes hierarquias no processo decisório (BYSTRZANOWSKA e TOBISZEWSKI, 2018;

KARL, 2022; TIAN, *et al*, 2023). A partir destas opções, os tomadores de decisões podem aplicar o método que melhor se encaixar na situação a ser resolvida, seja a decisão de uma nova fábrica, modal a ser escolhido, localização de novas instalações industriais, entre outros.

2.6.1.2 Métodos de localização para tomada de decisão

A tomada de decisão quanto a localização de fábricas, hubs logísticos, centro de distribuição, estações de transbordo, dentre outras, é de fundamental importância para o alcance de resultados positivos para as empresas e envolve diversos aspectos, como, tempo para o deslocamento, custos, meios de transporte, tipo de infraestrutura e possíveis impactos ambientais oriundos das operações (HIASSAT, DIABAT e RAHWAN, 2017). Neste sentido, existem diversos métodos que podem auxiliar as empresas na tomada de decisão, no quadro 3, constam cinco exemplos de métodos para esta finalidade.

Quadro 3: Exemplos de métodos para decisão de localização

Cinco métodos de localização para tomada de decisão	Descrição	Referências
Centro de Gravidade	Abordagem quantitativa que ajuda a identificar a localização ideal para instalações, focando na minimização dos custos totais de transporte, calculando um ponto central ponderado com base na produção e no consumo de bens.	SOARES et al (2020); LYRA (2021).
Programação Linear	Busca solução ótima para um problema, seja de localização, alocação de recursos, maximização de lucros, minimização de custos, entre outros.	HIASSAT, DIABAT e RAHWAN (2017); KUMAR, JHA e SINGH (2020).
Fuzzy	Campo da matemática e da inteligência artificial que lida com a representação e manipulação de incerteza e imprecisão, permite a representação de informações variáveis não binárias, aplicado a diversos segmentos, como, economia, engenharia e outros.	JAVANMARD e MISHMAST NEHI (2019); KUMAR, JHA e SINGH (2020).
Sistemas de Informações Geográficas (SIG)	Permite a integração de dados geográficos (mapas, imagens de satélite, climas, populações e outros) com dados alfanuméricos, os quais possibilitam a tomada de decisão com mais precisão.	DE BARROS FRANCO, STEINER e ASSEF (2021); CASTIGLIO (2022).
Facility Location Problem (FLP)	Método que busca encontrar as melhores localizações para um conjunto de facilidades/instalações de fábricas, armazéns, centros de distribuição, eixos logísticos e outros, de forma a minimizar o custo total.	HIASSAT, DIABAT e RAHWAN (2017); MATOS e THOMÉ (2019); JAVANMARD e MISHMAST NEHI (2019).

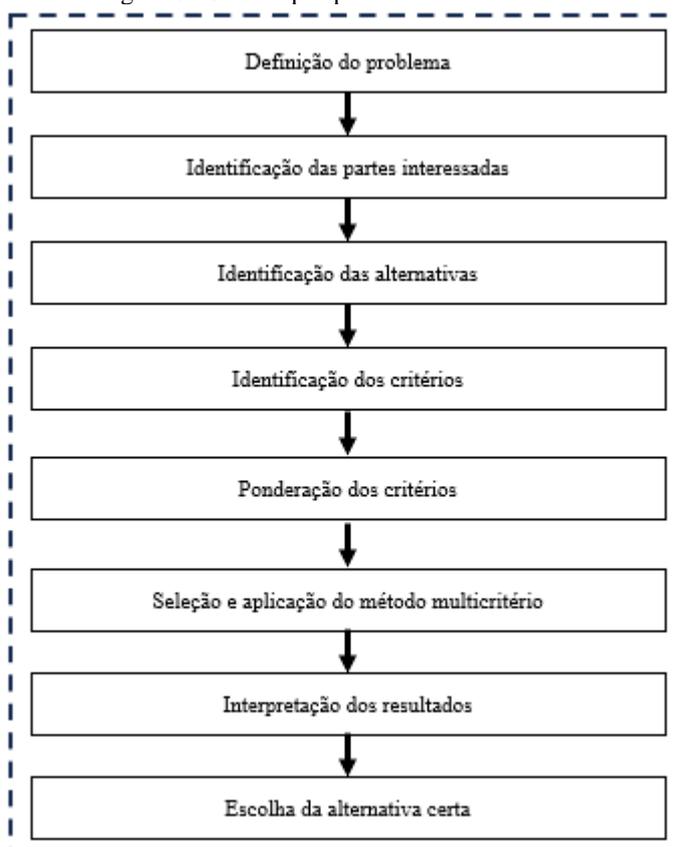
Fonte: Autoria própria (2023).

Os cinco exemplos acima, corroboram para decisões empresariais em diversas frentes, como a identificação estratégica de instalações (Matos e Thomé, 2019; Javanmard e Mishmast

Nehi, 2019; Soares *et al*, 2020 e Lyra, 2021), alocação de recursos (Hiassat, Diabat e Rahwan, 2017; Kumar, Jha e Singh, 2020), decisões que envolvam uso de inteligência artificial (Javanmard e Mishmast Nehi, 2019; Kumar, Jha e Singh, 2020) e que necessitem de dados geográficos mais precisos para determinar o local exato das instalações (DE BARROS FRANCO, STEINER e ASSEF, 2021; CASTIGLIO, 2022).

Desta forma, Bystrzanowska e Tobiszewski, 2018, desenvolveram oito etapas (figura 5) para tomada de decisão que corroboram com o que foi discutido nesta seção, a saber:

Figura 5: Oito etapas para tomada de decisão



Fonte: Adaptado de BYSTRZANOWSKA e TOBISZEWSKI (2018).

Assim, as etapas e métodos apresentados nesta seção sugerem às organizações um roteiro para auxílio à tomada de decisão. Ao considerar a literatura e alinhar com as necessidades das empresas, é possível tomar decisões sobre diversos aspectos e alcançar os objetivos organizacionais.

Dessa forma, a integração entre ferrovias, indústria 4.0, competitividade, tomada de decisão, métodos multicritérios e de localização não apenas favorece a implantação de novos projetos ferroviários, mas também pode impulsionar o desenvolvimento econômico e sustentável da região, abrindo novas oportunidades de negócios e fortalecendo a infraestrutura logística do país (QIAN, et al, 2019; ISLER; ASAFF; MARINOV, 2020 e RUMO, 2023).

3 ARRANJO ESPACIAL E ECONÔMICO DO ESTADO DA BAHIA

O estado da Bahia é uma das 27 unidades federativas do Brasil, localizado na Região Nordeste do país. A Bahia faz divisa com oito estados brasileiros: Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Piauí, Tocantins, Goiás, Minas Gerais, e Espírito Santo. Além disso, possui uma extensa costa banhada pelo Oceano Atlântico de 1181 km de extensão, de acordo com a SEMA BAHIA (2022).

A economia baiana é diversificada, com destaque para setores como agricultura (sendo um dos maiores produtores nacionais de cacau, café, frutas, grãos e outros), pecuária, indústria, comércio, serviços, turismo e a indústria de petróleo e gás. O estado da Bahia, de acordo com dados do IBGE (2022) tem uma população estimada em 14.136.417 habitantes e uma área territorial de 564.760,429 mil km². A Bahia tem uma extensão de 124.545 km entre rodovias federais, estaduais e municipais, conforme informações do SEI BAHIA (2022).

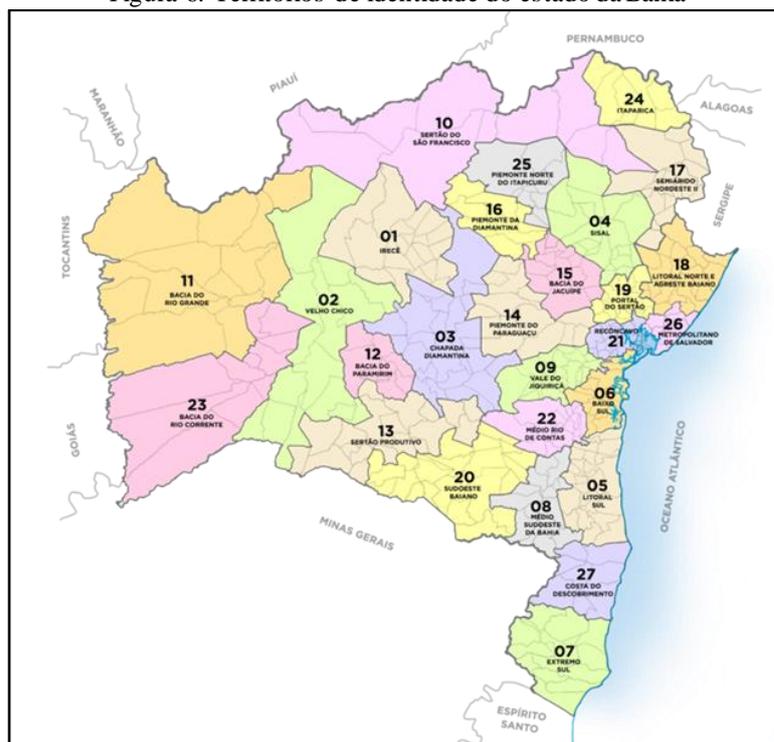
3.1 Territórios de Identidade do estado da Bahia e o modal ferroviário de cargas

O estado é dividido em 27 territórios de identidade, desta forma, a secretaria de cultura do estado, a SecultBA afirma que:

A constituição dos Territórios de Identidade (TI) aconteceu a partir de 2007. A SecultBA utilizou-se de conceito da SEI – Superintendência de Estudos Econômicos, para o MDA – Ministério do Desenvolvimento Agrário, lastreados pelo conceito de Território, muito adequado à lógica cultural. São reconhecidos 27 Territórios de Identidade, demarcados por critérios ambientais, econômicos e culturais, entre outros, além de observar as populações como grupos sociais relativamente distintos, os quais indicam identidade, coesão social, cultural e territorial. Deste modo, a SecultBA assumiu a Política de Territorialização da Cultura, em todas as suas instâncias, em atenção à diversidade de manifestações culturais dos Territórios de Identidade. SECULTBA, (2022).

Os 27 territórios de identidade (figura 6) percorrem os 417 municípios baianos, e têm como objetivo promover a integração de ações entre as esferas governamentais e a sociedade civil, buscando o desenvolvimento econômico, social e sustentável em cada região. Cada território de identidade possui características e demandas específicas, levando em consideração as particularidades de cada área do estado. Estes territórios funcionam ainda como espaços de articulação e diálogo entre os governos municipais, estaduais e a sociedade civil, permitindo a elaboração de planos e estratégias de desenvolvimento regional, considerando as demandas e necessidades específicas de cada área (SECULTBA, 2022).

Figura 6: Territórios de identidade do estado da Bahia



Fonte: SECULTBA (2022).

Estes territórios, possuem diversidades de vocações financeiras, sociais e culturais, desta forma, transportar commodities, produtos e pessoas são desafios constantes para empresas e governos (estadual e municipais), assim, estes territórios compõem ainda as sete regiões econômicas do estado, as quais são divididas entre Sul, Centro Sul, Extremo Oeste, Vale do São Francisco, Centro Norte, Nordeste e Metropolitana, conforme tabela 6.

Tabela 6: Atividade econômica das regiões do estado da Bahia

Regiões do Estado - Bahia	Quantidade municípios	Principais vocações produtiva/financeira
1ª Extremo Oeste	24	Soja, algodão, milho e pecuária leiteira
2ª Vale do São Francisco	27	Produção de frutas e grãos, principalmente soja, milho e feijão e bioenergético
3ª Centro Norte	80	Produção e beneficiamento do sisal, hortifrutigranjeiros, aves e suínos e polo calçadista
4ª Nordeste	60	Pecuária bovina e caprinos; produção de grãos (feijão, milho, arroz, amendoim e algodão), cervejaria e bebidas
5ª Metropolitana	38	Indústria química, metalúrgica, siderúrgica, de plásticos, bebidas, fertilizantes e serviços (turismo e indústria cultural)
6ª Centro Sul	118	Polo de Informática, mobiliário, perfumaria, papel e celulose, agropecuária e policultura
7ª Sul	70	(mamão, café, coco, abacaxi, melancia, cacau e mandioca).

Fonte: Adaptado de SEI BAHIA (2022).

Estas sete regiões foram atendidas no quesito transporte de cargas em grande parte pelo modal rodoviário, conforme dados da tabela 7 abaixo, a tabela traz ainda número de cidades em cada região e habitantes, PIB do ano de 2022, modal utilizado para escoamento da produção local.

Tabela 7: Características das regiões produtivas do estado da Bahia

Regiões econômicas nos territórios de identidade da Bahia	Número de cidades e habitantes	PIB em bilhões, ano 2022	Modais utilizados
1º Extremo Oeste	24 cidades, com uma população estimada de 661.937 habitantes.	12,2	Rodoviário e Aéreo.
2º Vale do São Francisco	27 cidades, com uma população estimada em 991.162 habitantes.	13,4	Rodoviário e aéreo.
3º Centro Norte	80 cidades, com uma população estimada em 2.311.445 habitantes.	10,8	Rodoviário e aéreo.
4º Nordeste	60 cidades, com uma população estimada em 1.550.036 habitantes.	7,5	Rodoviário e aéreo.
5º Metropolitana	38 cidades, com uma população estimada em 4.044.030 habitantes.	135,9	Rodoviário aquaviário ferroviário aéreo e dutoviário.
6º Centro Sul 7º Sul	188 cidades, com uma população estimada em 4.533.050 habitantes.	170,1	Rodoviário, ferroviário, aquaviário e aéreo.

Fonte: Adaptado de IBGE, 2022; SEI BAHIA, 2022.

As regiões citadas, bem como suas características, sugerem o potencial que o estado da Bahia tem para atuação do modal ferroviário de cargas, além disso, evidencia que há uma predominância do modal rodoviário, o que pode suscitar custos elevados para escoamento da produção do estado, daí a importância de estudar a possibilidade na mudança da malha logística com o aumento na participação do modal ferroviário e tecnologias.

Outrossim, as informações contidas na tabela 7, sugere ainda que a utilização em massa do modal rodoviário, contribui para, por exemplo, o aumento da emissão de gases do efeito estufa. Dados do Sistema de Estimativas de Gases (SEEG) divulgados pela Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF) apontam que:

As emissões do transporte de carga em 2021 representaram 11,1% das emissões líquidas totais do país (cerca de 760 milhões de toneladas), uma redução de 34,2% em comparação a 2011, em sua participação. O modo rodoviário respondeu pela emissão de mais de 715 milhões de toneladas de CO₂, equivalente a 79% das emissões do setor. Já o modo ferroviário foi responsável por 2,9%, equivalentes a quase 22,4 milhões de toneladas. É uma redução de 14,1% em sua participação, quando comparado a 2011 (ANTT, 2023).

Neste sentido, uma composição ferroviária com 120 vagões, substitui 368 caminhões nas estradas, reduzindo os impactos ambientais e no trânsito, a ANTT (2023) corrobora ainda informando que um vagão transporta mais de 100 toneladas contra as 33 toneladas de capacidade de uma carreta convencional. Todas estas informações sugerem que o modal ferroviário tem em sua capacidade de carga e no tocante a sustentabilidade ambiental, pontos cruciais de vantagens na comparação com o modal rodoviário.

Essas regiões trouxeram para o estado um PIB (Produto Interno Bruto) no ano de 2022 cerca de R\$ 401 bilhões, divididos da seguinte forma, segundo dados do SEI BAHIA 2022.

Em 2022, o PIB da Bahia totalizou R\$ 401 bilhões, sendo R\$ 356,8 bilhões referentes ao Valor Adicionado (VA) e R\$ 44,2 bilhões aos impostos. O valor adicionado dos grandes setores ficou distribuído da seguinte forma: Agropecuária (R\$ 45,1 bilhões), Indústria (R\$ 86,5 bilhões) e Serviços (R\$ 225,2 bilhões). SEI BAHIA 2022.

Assim, vale ressaltar que as sete regiões dependem do escoamento da produção para gerar riquezas e este escoamento é realizado em grande parte por estradas com a utilização do modal rodoviário de cargas, impactando diretamente nos custos e reduzindo a competitividade frente a outros estados.

Dados do governo do estado da Bahia, através do site oficial Investe Bahia e FIEB (Federação das Indústrias do Estado da Bahia), fornecem informações sobre as distâncias dos principais polos industriais do estado para os portos e aeroportos. Isso poderá justificar a busca por uma expansão da malha ferroviária para atender de maneira mais econômica e eficiente o escoamento da produção. Estes dados estão representados no quadro 4, com um exemplo de polo de cada região e suas respectivas distâncias para os portos e aeroportos.

Quadro 4: Distâncias dos principais polos industriais do estado para os portos e aeroportos

Regiões do Estado - Bahia	Polo industrial	Principais Portos	Distância em km	Principais Aeroportos	Distância em km
1ª Extremo Oeste	Barreiras	Aratu	866	Ilhéus	880
		Salvador	895	Salvador	913
2ª Vale do São Francisco	Juazeiro	Aratu	478	Petrolina	24
		Salvador	523	Salvador	541
3ª Centro Norte	Feira de Santana	Aratu	89,4	Feira de Santana	11,1
		Salvador	115,8	Salvador	107,3

4ª Nordeste	Alagoinhas	Aratu	97,4	Feira de Santana	75,5
		Salvador	122	Salvador	116
5ª Metropolitana	Camaçari	Aratu	35	Feira de Santana	101,3
		Salvador	57	Salvador	32
6ª Centro Sul	Vitória da Conquista	Aratu	507	Vitória da Conquista	9
		Salvador	547	Salvador	557
		Ilhéus	302	Ilhéus	289
7ª Sul	Ilhéus	Aratu	445	Porto Seguro	316
		Salvador	485	Salvador	495
		Ilhéus	4	Ilhéus	9

Fonte: Adaptado de INVESTE BAHIA (2018) e FIEB (2020).

Os dados acima reforçam a importância de repensar a malha logística, principalmente para um escoamento mais eficiente da produção através de ferrovias. De acordo com os dados citados a Bahia acompanha o cenário nacional na utilização do modal rodoviário de cargas com um percentual de 66,2% (PNL, 2018). Assim, estes dados sugerem que as ferrovias são uma alternativa para fazer parte dessa redistribuição da malha logística. No estado da Bahia, a operação ferroviária ativa é da empresa VLI MULTIMODAL S.A, conectando sete estados e o Distrito Federal, a empresa se tornou a principal via de integração entre as regiões Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste do Brasil (SEI BAHIA, 2022).

No ano de 2020, de acordo com dados da ANTT, foram transportados por ferrovias no Estado da Bahia 42.347.817 milhões de toneladas de produtos. Na tabela 8 consta a distribuição destas toneladas por produtos.

Tabela 8: Principais produtos transportados por ferrovias na Bahia

Principais produtos transportados por ferrovia na Bahia	Toneladas	% Transportado
Minérios e outros produtos da extração mineral	30.754.752	72,62%
Produtos agrícolas	10.782.562	25,46%
Outros produtos	810.503	1,91%
Total	42.347.817	

Fonte: ANTT, 2020.

A partir dos dados contidos na tabela acima, é possível identificar o quanto o setor de mineração é importante para o transporte ferroviário, por outro lado os produtos agrícolas também têm uma presença significativa, refletindo a importância da produção agrícola no estado. Além disso, é interessante notar que outros produtos, como combustíveis, produtos químicos e materiais de construção, também são transportados por ferrovias na Bahia, embora em menor volume.

Neste sentido, para aumentar a participação das ferrovias na malha logística do estado, a ferrovia de integração oeste leste (FIOL) foi projetada e está sendo construída com atuação prevista para atender o segmento de mineração, além disso, terá 537 quilômetros de extensão ligando as cidades de Ilhéus a Caetitê, no estado da Bahia (a empresa BAMIN (Bahia Mineração) ficou responsável pela concessão com período de 35 anos), e um total de 1.527 km de extensão, que ligará o futuro porto de Ilhéus (no litoral da Bahia) ao município de Figueirópolis (no Tocantins), onde será conectada a Ferrovia Norte-Sul (BRASIL, 2021).

A partir da implantação da FIOL o segmento de mineração será beneficiado no que diz respeito ao transporte mais eficiente de sua produção, pois o escoamento ao invés de ser realizado pelas rodovias, será efetivado através da ferrovia de integração oeste leste (BRASIL, 2021). Ademais, a variação dos produtos transportados evidencia a importância do transporte ferroviário para a economia da Bahia e do país como um todo.

No entanto, a predominância do modal rodoviário de cargas para o escoamento da produção nessas regiões impacta diretamente nos custos logísticos e na competitividade frente a outros estados, como por exemplo, Minas Gerais, São Paulo, Mato Grosso do Sul, entre outros (EPL, 2021 e ANTT, 2023). Diante desse cenário, a literatura consultada sugere a necessidade de repensar a malha logística, com um maior investimento no modal ferroviário, que apresenta vantagens em capacidade de carga transportada em longas distâncias (RIBEIRO, 2018; SACOMANO *et al*, 2018; PACCHINI *et al*, 2019 e LAITON-BONADIEZ *et al*, 2022).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O método utilizado neste trabalho para solução do problema e alcance dos objetivos é a DSR (*Design Science Research*) também conhecida como ciência do *design*. Este método de pesquisa é projetado para desenvolver soluções práticas que fundamenta e operacionaliza a condução da pesquisa quando o objetivo a ser alcançado é um artefato ou uma prescrição (DRESCH, LACERDA e JUNIOR, 2020).

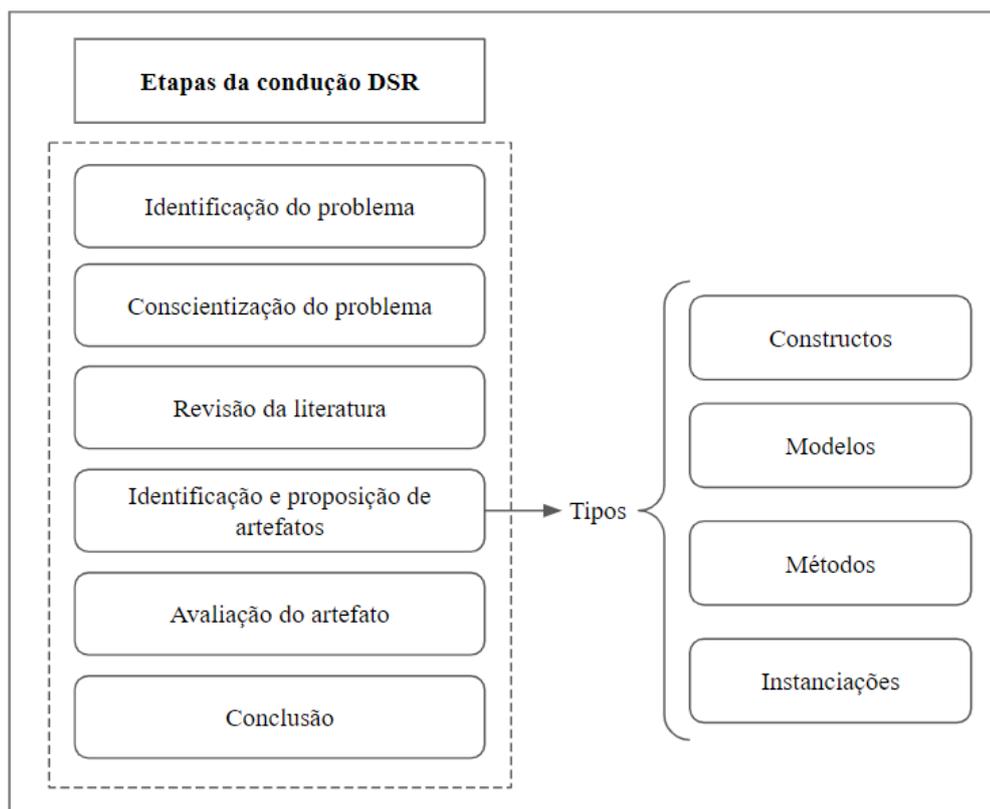
Neste sentido, os autores afirmam ainda que:

Como método de pesquisa orientado à solução de problemas, a *design science research* busca, a partir do entendimento do problema, construir e avaliar artefatos que permitam transformar situações, alterando suas condições para estados melhores ou desejáveis. Ela é utilizada nas pesquisas como forma de diminuir o distanciamento entre teoria e prática (DRESCH, LACERDA e JUNIOR, 2020, p. 67).

A DSR, traz em seu âmago o rigor e a relevância na condução da pesquisa, justamente para que o resultado esperado seja alcançado. Desta forma, é comum para os autores que utilizaram este método (LACERDA, *et al*, 2013; DRESCH, LACERDA e JUNIOR, 2020; SOUZA, *et al*, 2020; ARAUJO, DOS SANTOS LOPES, 2022; FERREIRA, *et al*, 2022) a afirmação de que a DSR tem uma característica fundamental que é ser orientada à solução de problemas específicos, não necessariamente buscando a solução ótima, mas a solução satisfatória para a situação.

O cerne da DSR para solução de problemas são os artefatos, desta forma, Dresch, Lacerda e Junior (2020) afirmam que a partir das necessidades organizacionais observadas, bem como dos problemas de interesse do investigador, a DSR pode sustentar o desenvolvimento e a construção de artefatos e contribuir para fortalecer a base de conhecimento existente. A seguir, na figura 7, constam as etapas para utilização da DSR como método de pesquisa, de acordo com (DRESCH, LACERDA e JUNIOR, 2020; FERREIRA, *et al*, 2022):

Figura 7: Etapas para utilização do método DSR



Fonte: Adaptado de: (DRESCH, LACERDA e JUNIOR, 2020); e (FERREIRA, *et al*, 2022).

A sequência para utilização do método DSR serve para garantir o rigor e a relevância dos resultados a serem alcançados, assim, estas etapas têm as seguintes características, conforme (DRESCH, LACERDA e JUNIOR, 2020); e (FERREIRA, *et al*, 2022):

- **Identificação do problema** - surge, principalmente, do interesse do pesquisador em estudar uma nova ou interessante informação, encontrar resposta para uma questão importante, ou a solução para um problema prático ou para uma classe de problemas. Nesta fase, a saída é o problema de pesquisa formalizado, afirmam os autores.
- **Conscientização do problema** - nesta etapa o pesquisador deve buscar informações, assegurando a compreensão de suas facetas, causas e contexto. Além disso, precisam ser consideradas as funcionalidades do artefato, a performance esperada, bem como seus requisitos de funcionamento.
- **Revisão da literatura** - nesta fase o pesquisador realiza uma consulta às bases de conhecimento, por meio de uma revisão da literatura, contribuindo de forma significativa para validação do problema de pesquisa.
- **Identificação e proposição de artefatos** - nesta fase o pesquisador deve evidenciar, caso existam, artefatos e classes de problemas relacionados ao que ele está tentando

resolver. Os autores afirmam que é possível, contudo, que o pesquisador se depare com um artefato pronto e ideal, que atenda plenamente às suas necessidades para solucionar o problema. Nesse caso, os principais tipos de artefatos utilizados pelos autores citados são: constructos, modelos, métodos e instanciações.

O tipo de artefato constructo tem relação direta com os conceitos usados para descrever os problemas dentro do domínio e para especificar as respectivas soluções, geralmente classificados como elementos conceituais e/ou vocabulário de um domínio.

No artefato do tipo modelo, são considerados, como afirmam Dresch, Lacerda e Junior (2020), representações da realidade que apresentam tanto as variáveis de determinado sistema como suas relações. Um modelo pode também ser considerado uma descrição, isto é, uma representação de como as coisas são, tendo como principal preocupação sua utilidade, e não a aderência de sua representação da verdade (DRESCH, LACERDA e JUNIOR, 2020).

O artefato do tipo método é um conjunto de passos necessários para desempenhar determinada tarefa. Podem ser representados graficamente ou encapsulados em heurísticas e algoritmos específicos. Os métodos favorecem sobremaneira tanto a construção quanto a representação das necessidades de melhoria de um determinado sistema (DRESCH, LACERDA e JUNIOR, 2020).

O artefato do tipo instanciação, operacionaliza os outros artefatos (constructos, modelos e métodos). A operacionalização visa também demonstrar a viabilidade e a eficácia dos artefatos construídos. As instanciações informam como implementar ou utilizar determinado artefato e seus possíveis resultados no ambiente real. Elas podem se referir a um determinado artefato ou à articulação de diversos artefatos para a produção de um resultado em um contexto (DRESCH, LACERDA e JUNIOR, 2020).

- **Avaliação do artefato** - é a fase de observar e medir o comportamento do artefato na solução do problema. É nesse momento que os requisitos definidos na conscientização do problema precisam ser revistos e, posteriormente, comparados com os resultados apresentados, em busca do grau de aderência a essas métricas. Pode ser conduzida em um ambiente experimental ou em um contexto real, de diferentes maneiras.

Existem formas estruturadas para avaliar um artefato (quadro 5), conforme (HEVNER, MARCH E PARK, 2004) e (DRESCH, LACERDA e JUNIOR, 2020):

Quadro 5: Formas e métodos de avaliação de um artefato

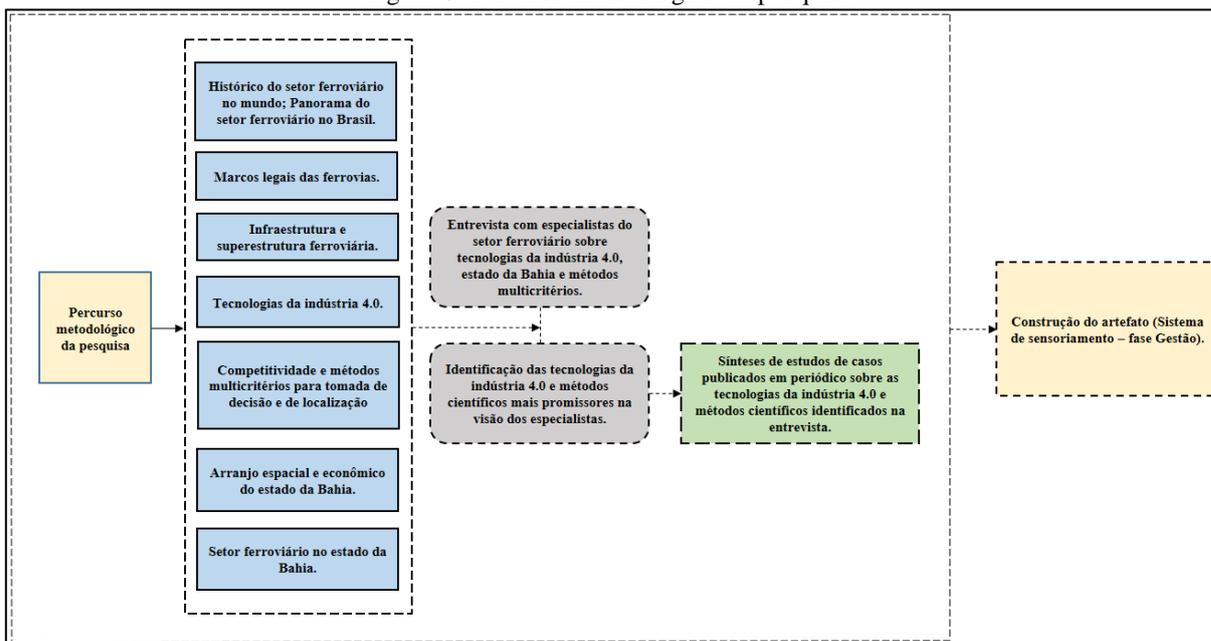
Formas de avaliação	Método proposto
Observacional	Estudo de caso - estudar o artefato existente, ou não, em profundidade no ambiente de negócio.
	Estudo de campo - monitorar o uso do artefato em múltiplos projetos.
Analítico	Análise estatística - examinar a estrutura do artefato para qualidades estáticas.
	Análise da arquitetura - estudar o encaixe do artefato na arquitetura técnica do sistema técnico geral.
	Otimização - demonstrar as propriedades ótimas inerentes ao artefato ou demonstrar os limites de otimização no comportamento do artefato.
	Análise dinâmica - estudar o artefato durante o uso para avaliar suas qualidades dinâmicas.
Experimental	Experimento controlado - estudar o artefato em um ambiente controlado para verificar suas qualidades, por exemplo, usabilidade.
	Simulação - executar o artefato com dados artificiais.
Teste	Teste funcional (<i>Black Box</i>) - executa as interfaces do artefato para descobrir possíveis falhas e identificar defeitos.
	Teste estrutural (<i>White Box</i>) - realiza testes de cobertura de algumas métricas para implementação do artefato, por exemplo, caminho para execução.
Descritivos	Argumento informado - utilizar a informação das bases de conhecimento, por exemplo, das pesquisas relevantes, para construir um argumento convincente a respeito da utilidade do artefato.
	Cenários - construir cenários detalhados em torno do artefato, para demonstrar sua utilidade.

Fonte: Adaptado de HEVNER, MARCH E PARK (2004) e DRESCH, LACERDA e JUNIOR (2020).

- **Conclusão** - explicitação das aprendizagens obtidas durante o processo de pesquisa, declarando fato de sucesso e pontos de insucesso, o objetivo dessa etapa é assegurar que a pesquisa realizada possa servir de referência e como subsídio para a geração de conhecimento, tanto no campo prático quanto no teórico.

O método DSR tem total aderência a proposta deste trabalho, visto que, foi criado um artefato para auxílio à tomada de decisão no que se refere a projeto de implantação de ferrovias com tecnologias habilitadoras da indústria 4.0. Para isso, um percurso metodológico (figura 8 abaixo) foi criado, sendo o lócus da pesquisa o estado da Bahia, localizado na região nordeste do Brasil, que possui uma localização privilegiada na costa brasileira com quatro portos importantes (Salvador, Aratu, Enseada localizado em Maragogipe e Ilhéus) e uma economia diversificada em seus 27 territórios de identidade (tratados na seção 3) os quais fazem parte do âmago desta dissertação.

Figura 8: Percurso metodológico da pesquisa



Fonte: Autoria própria (2023).

Neste percurso constam as etapas que foram cruciais para o desenvolvimento e alcance dos resultados, como por exemplo, as etapas de entrevista com especialistas do setor ferroviário e a partir dos resultados, vem uma síntese de estudos de casos publicados em periódicos sobre as tecnologias da indústria 4.0 e métodos científicos identificados pelos especialistas como promissores para o modal ferroviário, logo em seguida este percurso culmina com a criação do artefato “Sistema de sensoriamento – Fase Gestão”. Já a tabela 9, contém a estrutura metodológica utilizada nesta dissertação, servindo de norte para toda construção do trabalho.

Tabela 9: Estrutura metodológica, etapas e conceitos.

Quanto à natureza	
Pesquisa básica	Objetivo principal é expandir o conhecimento científico e ampliar a compreensão dos fenômenos naturais ou sociais; os resultados podem fornecer a base para futuras pesquisas aplicadas e inovações tecnológicas.
Pesquisa aplicada	Tem como objetivo a resolução de problemas específicos e a aplicação prática do conhecimento científico; é orientada para a obtenção de resultados que possam ser utilizados para desenvolver novos produtos, tecnologias ou serviços, melhorar processos existentes ou abordar desafios práticos em diferentes áreas do conhecimento.
Quanto aos objetivos	
Pesquisa exploratória	Objetivo principal explorar um determinado tema, fenômeno ou problema de pesquisa, com o intuito de obter um maior entendimento e familiaridade com o assunto; o pesquisador busca compreender as complexidades do tema em estudo, identificar lacunas no conhecimento existente, capturar informações iniciais relevantes e gerar novas ideias e perspectivas.
Pesquisa explicativa	Objetivo principal investigar as relações de causa e efeito entre variáveis, buscando compreender e explicar os fenômenos estudados de maneira mais aprofundada; o pesquisador formula hipóteses ou questões de pesquisa com base em teorias existentes ou em resultados de pesquisas anteriores.

Quanto aos procedimentos

Pesquisa bibliográfica	A principal fonte de dados é a literatura existente sobre o tema em estudo, como, livros, artigos científicos, dissertações, teses, relatórios técnicos, sites especializados, entre outros.
Coleta de dados	
Documentação indireta	Análise de documentos existentes, como registros, relatórios, publicações, arquivos, mídias, entre outros, para obter informações relevantes sobre um determinado tema ou fenômeno em estudo.
Análise de dados	
Qualitativa	Ênfase na interpretação e no contexto; usa-se linguagem subjetiva e forma escrita para apresentação dos resultados.
Quantitativa	Dados são recolhidos a partir de questionários e formulários aplicados a um determinado grupo de pessoas (neste caso a pesquisa utilizou do estudo prospectivo quantitativo Survey com 18 especialista no setor ferroviário de cargas).

Fonte: Adaptado de PRODANOV e FREITAS (2013) e GIL (2019).

A partir da estrutura metodológica citada acima, foi possível dividir a pesquisa em seis etapas bibliométricas a saber na tabela 10.

Tabela 10: Etapas da pesquisa.

Etapas da pesquisa	Descrição das etapas
Etapa 1	Definição da linha de temática, problema, objetivos, descritores e o método.
Etapa 2	Buscas de trabalhos de acordo com os descritores em bases de dados.
Etapa 3	Leitura do título, resumo e palavras-chave dos trabalhos encontrados, identificando aqueles que dialogam com a etapa 1.
Etapa 4	Leitura completa dos trabalhos previamente selecionados, de acordo com a etapa 3.
Etapa 5	Escrita do referencial teórico e o capítulo de materiais e métodos.
Etapa 6	Escrita dos capítulos de resultados e considerações finais, formatação e finalização da dissertação.

Fonte: Autoria própria (2023).

Tomando como base tanto a estrutura metodológica quanto às etapas bibliométricas da pesquisa, utilizou-se para levantamento de trabalhos relacionados à temática deste, as plataformas de busca do Portal Capes, sites oficiais/empresas especializadas, *Google Scholar* e *Scopus*, com um total de 115 trabalhos analisados, conforme tabela 11. Em todas as plataformas o lastro temporal implementado nas buscas foi entre o ano de 2013 e 2023, buscando assim trabalhos acadêmicos mais recentes.

Tabela 11: Plataformas e estratégias de buscas

Plataformas de pesquisas	Estratégias utilizadas nas buscas	Quantitativos
--------------------------	-----------------------------------	---------------

Portal CAPES	Ferrovias e tecnologias 4.0.	6
Sites Oficiais / Empresas especializadas	Tecnologias de inspeção; Planejamento e Logística; Panorama global da logística; Cenário nacional do transporte terrestre; História das ferrovias no Brasil.	29
Google Scholar (artigos)	Modal ferroviário de cargas; ferrovias na Bahia; tecnologias da indústria 4.0 e as ferrovias; processo decisório; competitividade; types of methods for multicriteria; methods for solving FLP; Sistemas de Informações Geográficas (SIG).	31
Scopus (artigos)	“rail AND freight AND transport”; “freight AND transport AND sector”; types AND of AND methods AND for AND multicriteria AND decision AND making.	51
TOTAL		117

Fonte: Autoria própria (2023).

4.1 Pesquisa com especialistas do setor ferroviário

Buscou-se, para o alcance dos objetivos específicos, a realização de um estudo prospectivo com o intuito de captar o interesse dos especialistas no que se refere as tecnologias da indústria 4.0 e sua importância para o setor ferroviário, bem como, os desafios para este setor (como forma de instrumento de pesquisa) através do procedimento investigativo quantitativo Survey. Conforme Mineiro (2020), o objetivo do procedimento Survey é produzir descrições, predominantemente quantitativas ou numéricas, sobre alguns aspectos de uma população, coletando dados por meio de perguntas feitas às pessoas.

Assim, utilizou-se de uma entrevista contendo 17 perguntas, as quais foram respondidas por 18 especialistas com experiência no setor ferroviário de cargas, utilizando da amostragem não probabilística que de acordo com Mineiro (2020) a escolha da população depende dos critérios e julgamento do pesquisador, além disso, produzem economia de custos para levantamentos de entrevista pessoal e a probabilidade de seleção não pode ser calculada. Neste sentido, utilizou-se ainda os critérios como tempo mínimo de atuação de 2 anos no setor, além do interesse em participar da pesquisa (o roteiro da entrevista está contido no apêndice B). O questionário foi aplicado de forma remota, com a utilização do Google Forms para maior comodidade dos participantes, além disso, um termo de consentimento contendo esclarecimentos e responsabilidade da pesquisa foi elaborado e enviado (conforme documento no apêndice A).

4.1.1 Confiabilidade da amostra

Para verificação da confiabilidade do instrumento de pesquisa, foi utilizado o coeficiente Alfa de Cronbach. O coeficiente alfa de Cronbach foi proposto em 1951 por Lee J. Cronbach, para medir a confiabilidade de um instrumento de pesquisa, destaca Toro *et al.*

(2022). Este coeficiente tornou-se uma relevante ferramenta estatística nas pesquisas que envolvem a construção e aplicação de testes estatísticos.

A literatura é vasta em trabalhos sobre a utilização do Alfa de Cronbach para validar instrumentos de pesquisa, como o trabalho de Fernandes *et al.* (2024) que tiveram como objetivo construir e validar um instrumento para avaliar o *Lean Healthcare* nas instituições de saúde. RIEG *et al.* (2015) utilizaram o Alfa de Cronbach para avaliar a confiabilidade do instrumento de pesquisa que mediu a qualidade dos serviços de transporte metropolitano na cidade de São Paulo. E no trabalho de Freitas (2022) ele utilizou o coeficiente Alfa de Cronbach para medir a confiabilidade das respostas da pesquisa realizada com gerentes e pesquisadores sobre a importância da sustentabilidade no transporte.

Gaspar e Shimoya (2017); Toro *et al.* (2022), afirmam que o coeficiente alfa de Cronbach provou-se útil para verificar a confiabilidade de um questionário por pelo menos três razões:

1º O coeficiente alfa de Cronbach fornece uma medida razoável de confiabilidade em um único teste. Dessa forma, não são necessárias repetições ou aplicações paralelas de um teste para a estimativa da consistência do mesmo. 2º. A fórmula geral do coeficiente alfa de Cronbach permite sua aplicação a questionários de múltipla-escolha de escalas dicotômicas ou escalas atitudinais de variáveis categóricas politômicas. 3º. O coeficiente alfa de Cronbach pode ser facilmente calculado por princípios estatísticos básicos. GASPAR e SHIMOYA (2017); TORO *et al.* (2022).

A fórmula que representa o alfa de Cronbach é:

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{\sum s^2_{item}}{s^2_{total}} \right) \quad (1)$$

k = número de itens do questionário.

$\sum s^2_{item}$ = somatório da variância dos itens do questionário.

s^2_{total} = variância do escore total do questionário.

A variância é calculada pela seguinte fórmula:

$$S^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1} \quad (2)$$

x = escore para cada indivíduo

\bar{x} = média do escore.

n = número de respondentes

Utilizou-se da escala Likert classificando as respostas de forma crescente, iniciando pelo critério pouco importante até o extremamente importante (de 1 a 5). A partir da coleta das respostas baseada na escala Likert, vem a classificação da confiabilidade do coeficiente alfa de Cronbach, que de acordo com Gaspar e Shimoya (2017); Toro *et al.* (2022), variam de 0 a 1 e têm os seguintes limites:

- a) $\alpha \leq 0,30$ (consistência interna do questionário muito baixa).
- b) $0,30 < \alpha \leq 0,60$ (consistência interna do questionário baixa).
- c) $0,60 < \alpha \leq 0,75$ (consistência interna do questionário moderada).
- d) $0,75 < \alpha \leq 0,90$ (consistência interna do questionário alta).
- e) $\alpha > 0,90$ (consistência interna do questionário muito alta).

Desta forma, os resultados do questionário, bem como, a confiabilidade, serão demonstrados no capítulo 5 de resultados e discussão.

Ademais, para caracterização do artefato, foram analisados estudos de casos na literatura relacionados a tecnologia com o maior percentual de respostas positivas na entrevista, compilados na seção 5.2 e elaborada uma tabela (13) contendo outros trabalhos relacionados às demais tecnologias abordadas neste trabalho.

Por meio desta abordagem metodológica, este trabalho buscou apresentar uma prescrição factível para auxílio à tomada de decisões no tocante a projeto de implantação de ferrovias com tecnologias habilitadoras da indústria 4.0. Desta forma, os resultados alcançados estão dispostos no capítulo a seguir.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados a trajetória e os resultados da caracterização e construção do artefato, iniciando pelos resultados da entrevista realizada com 18 especialistas na área de ferrovias.

Na sequência, uma síntese de estudos de casos relacionados à implementação de sensores inteligentes e monitoramento remoto em componentes da superestrutura ferroviária, bem como, de método de localização e multicritérios para tomada de decisão, complementando com uma tabela com outras tecnologias da indústria 4.0 aplicáveis nos mesmos componentes. Todo esse percurso culmina com o artefato criado, buscando o alcance dos objetivos do trabalho.

5.1 Análise dos resultados da entrevista com especialista do setor ferroviário

A entrevista possui 17 perguntas (itens), divididas em três blocos: o primeiro bloco com as perguntas de 1 a 5, as quais estão relacionadas a indústria 4.0 e as tecnologias aplicáveis aos componentes da superestrutura ferroviária; de 6 a 9 estão relacionadas aos principais desafios que podem ser enfrentados no setor ferroviário na implementação de tecnologias e de 10 a 17 estão relacionadas ao estado da Bahia, transporte ferroviário e o auxílio à tomada de decisão. Nesta amostra constam 18 especialistas, sendo que 66,7% (12 especialistas) são do estado da Bahia e os outros 33,3% (6 especialistas) são de outros estados.

Para validar a confiabilidade das respostas do questionário, foi aplicado o coeficiente Alfa de Cronbach, mencionado no capítulo anterior. Neste sentido, os dados obtidos nesta aplicação estão dispostos no quadro 6 abaixo.

Quadro 6: Dados do coeficiente Alfa de Cronbach

σ Coeficiente de confiabilidade	0,8954
k é o número de itens	17
$\sum_{i=1}^k Si^2$ Somatório da variância dos itens	11,827
Si^2 Variância total	75,201

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Os dados relacionados à quantidade de respondentes e as questões, bem como, a aplicação do coeficiente Alfa de Cronbach, com a utilização do Microsoft Excel, estão contidos na tabela 12.

Tabela 12: Dados da aplicação do coeficiente Alfa de Cronbach no questionário

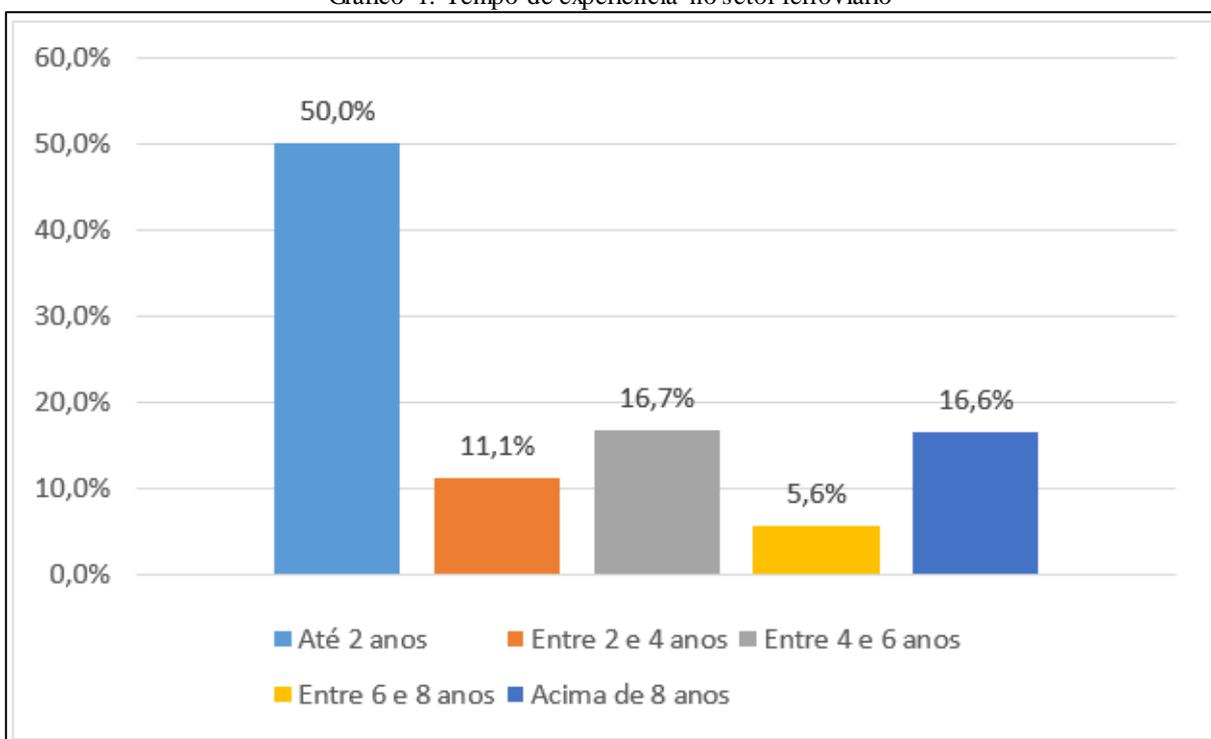
Respondentes	Questões (Itens)																	Soma
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
1	4	5	5	5	5	5	4	3	5	4	5	5	5	5	5	4	4	78
2	3	4	5	5	5	5	4	5	5	3	5	5	5	5	4	5	4	77
3	4	5	5	4	5	5	5	3	4	3	4	2	2	4	3	3	5	66
4	3	5	3	3	4	4	4	4	4	3	5	5	5	5	4	4	4	69
5	4	4	5	4	5	3	3	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	67
6	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	3	4	4	4	4	4	65
7	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	41
8	3	3	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	80
9	3	3	3	3	3	4	4	4	4	1	4	4	4	4	4	4	4	60
10	2	3	5	5	5	4	3	4	4	1	5	5	4	4	4	4	4	66
11	3	3	3	3	3	5	5	5	5	2	5	5	5	5	4	5	4	70
12	2	5	5	4	5	5	5	5	5	4	5	5	4	5	5	5	4	78
13	3	5	5	5	5	4	4	3	5	3	5	5	4	5	5	4	5	75
14	2	4	4	4	4	4	4	5	4	2	4	5	4	4	4	4	4	66
15	3	4	4	3	5	5	5	5	5	3	5	5	5	5	5	5	4	76
16	4	4	4	4	5	4	3	4	4	4	5	5	5	4	3	4	3	69
17	3	5	5	5	5	5	3	4	3	2	5	5	5	5	3	3	2	68
18	3	4	4	4	5	4	4	3	4	3	4	3	4	5	5	3	4	66
Variância	0,471	0,824	0,889	0,824	0,850	0,683	0,693	0,824	0,654	1,088	0,379	0,958	0,683	0,382	0,575	0,526	0,526	
Somatório Variância	11,827																	
Variância da soma itens	75,201																	

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Com o “ σ Coeficiente de confiabilidade” de 0,8954 (quadro 6), o questionário mostrou-se de acordo com a escala de Gaspar e Shimoya (2017); Toro *et al.* (2022), uma alta consistência, o que nos levou a perceber que as respostas ajudaram no alcance dos objetivos propostos.

Antes das 17 perguntas focadas no âmago da dissertação, fez-se necessário um levantamento do tempo de experiência dos respondentes, bem como, o tipo de instituição que os especialistas têm vínculo. Assim, a amostra escolhida para a pesquisa foi de 18 especialistas no setor, no gráfico 1 constam o tempo de experiência/envolvimento no setor.

Gráfico 1: Tempo de experiência no setor ferroviário



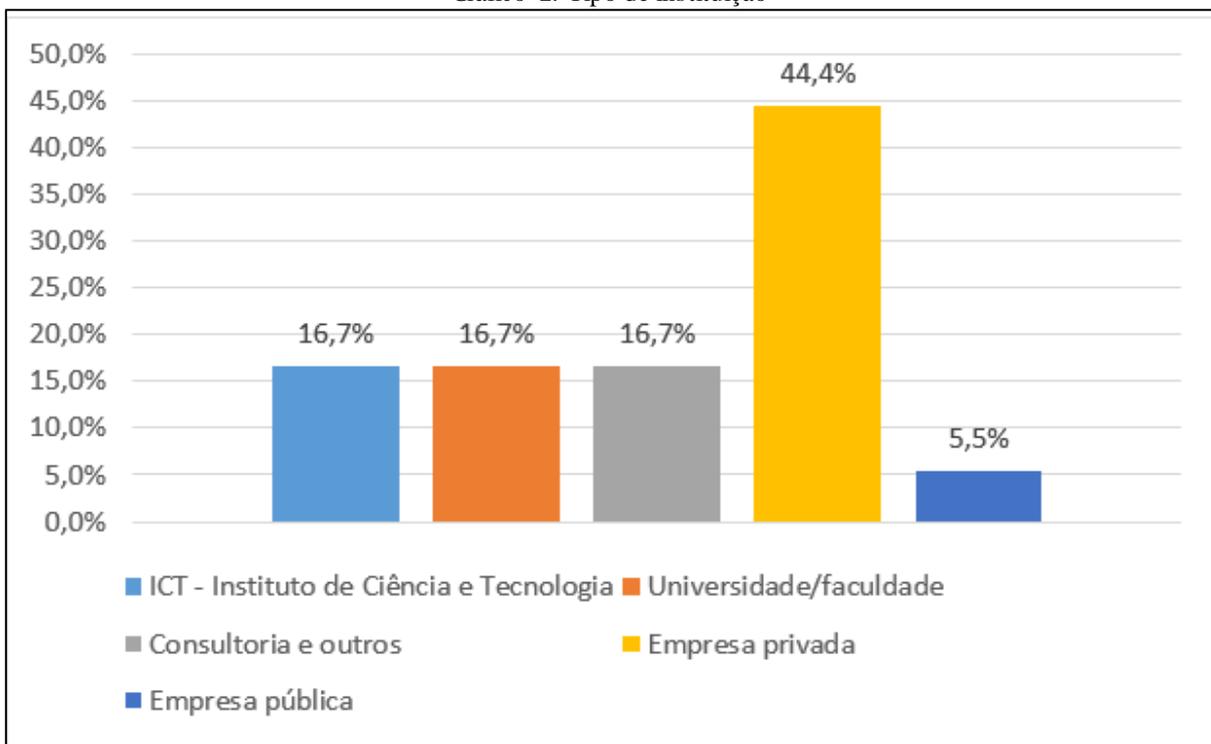
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A pesquisa mostrou que 50% dos respondentes possuem até 2 anos de experiência/envolvimento no setor, 27,8% estão no setor com experiência entre 2 e 6 anos, enquanto que 22,3% possuem acima de 6 anos de experiência, acredita-se que com o tempo de experiência dos especialistas as respostas tragam “insights” valiosos sobre as nuances do setor, visto que, perguntas mais específicas sobre, por exemplo, componentes ferroviários no contexto das tecnologias, foram feitas e para tal sugere que os especialistas tenham conhecimento prévio para uma resposta mais técnica.

No que diz respeito ao tipo de instituição na qual os especialistas trabalham, 61,1% afirmaram que atuam em empresa privada e consultoria, 33,4% atuam em instituto de ciência e

tecnologia e universidade e 5,5% atuam em empresa pública, estes dados estão dispostos no gráfico 2 abaixo. Com estas informações, acredita-se que a expertise dos respondentes qualificou a entrevista e conseqüentemente as informações para a caracterização do artefato elaborado.

Gráfico 2: Tipo de instituição

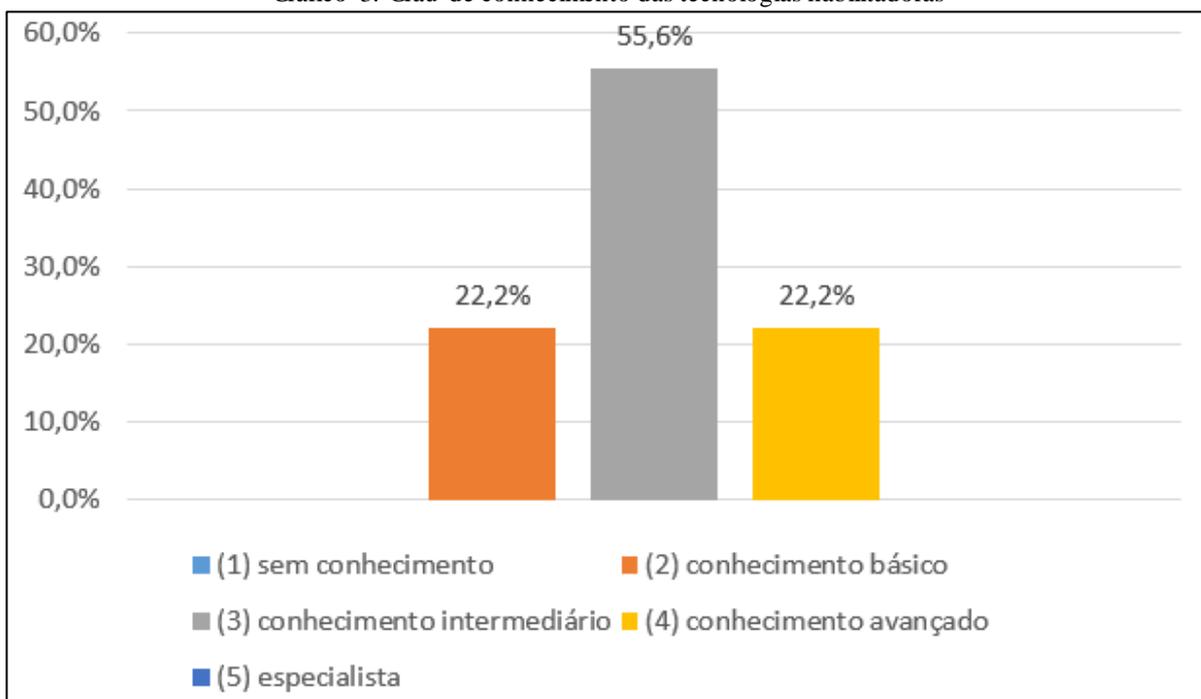


Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A partir dos dados demonstrados nos gráficos 1 e 2 acredita-se que houve coerência com as respostas às questões técnicas, visto que, o tempo de experiência e o tipo de empresa, sugerem ainda que estes especialistas entenderam a importância de contribuir com suas respostas para um melhor entendimento sobre as tecnologias da indústria 4.0, ferrovias, estado da Bahia e métodos científicos para tomada de decisão e localização. Assim, o primeiro bloco de perguntas, de 1 a 5 estão relacionadas a indústria 4.0 e as tecnologias (Big Data, Realidade Aumentada e Virtual, Inteligência Artificial, Sensores Inteligentes e Monitoramento Remoto).

A primeira pergunta neste bloco, foi relacionada ao grau de conhecimento dos especialistas no tocante as tecnologias e foi identificado que 77,8% dos especialistas afirmaram que possuem conhecimento entre intermediário e avançado sobre as tecnologias habilitadoras da indústria 4.0, enquanto que 22,2% afirmaram ter conhecimento básico sobre as tecnologias, estes dados estão no gráfico 3.

Gráfico 3: Grau de conhecimento das tecnologias habilitadoras



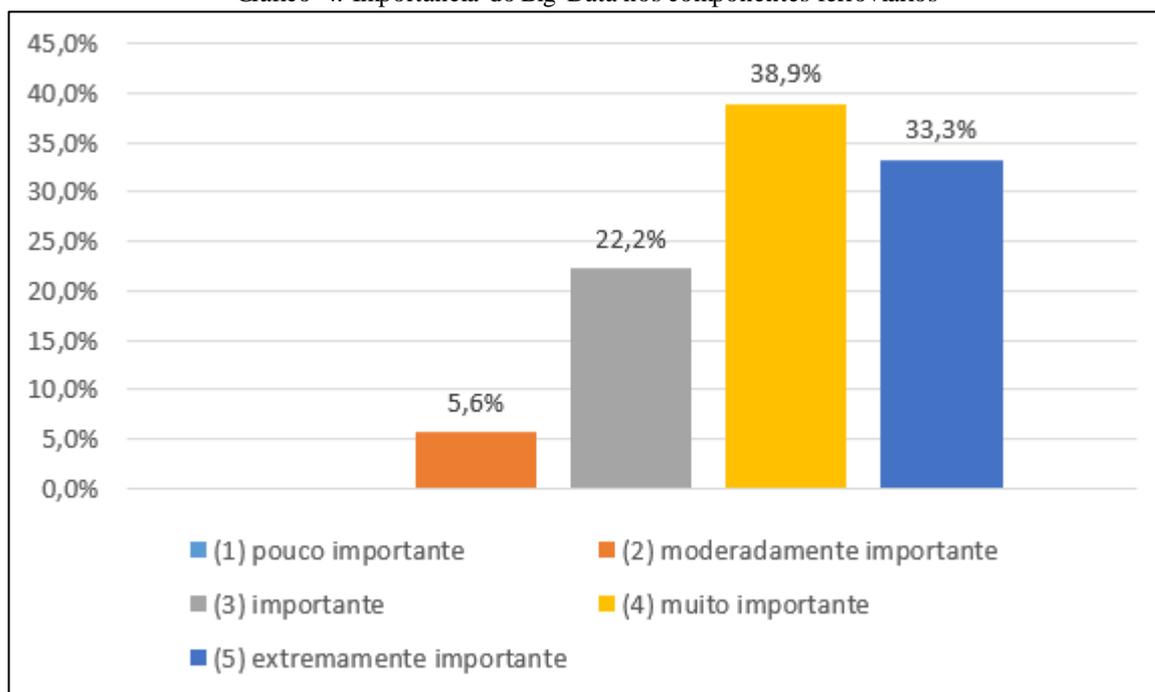
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Estes dados apontam para a confiabilidade das próximas respostas, visto que, na sequência, são questões mais específicas voltadas à importância das tecnologias nos componentes ferroviários, o que corrobora com a pergunta de pesquisa e os objetivos propostos nesta dissertação, bem como com a caracterização do artefato.

No gráfico 4 abaixo, constam os dados referentes à importância dada pelos respondentes a aplicação da tecnologia Big Data nos componentes ferroviários. Estes dados mostram que 72,2% dos especialistas classificaram a tecnologia mencionada como muito importante e extremamente importante para aprimorar a eficiência e a manutenção dos componentes ferroviários, sendo que 22,2% classificaram como moderadamente importante e 5,6% como importante.

Estes dados sugerem algo positivo quanto a pergunta norteadora desta pesquisa que versa sobre tecnologias da indústria 4.0 e sua utilização para tornar mais competitivo o modal ferroviário de cargas nos territórios de identidades do estado da Bahia.

Gráfico 4: Importância do Big Data nos componentes ferroviários



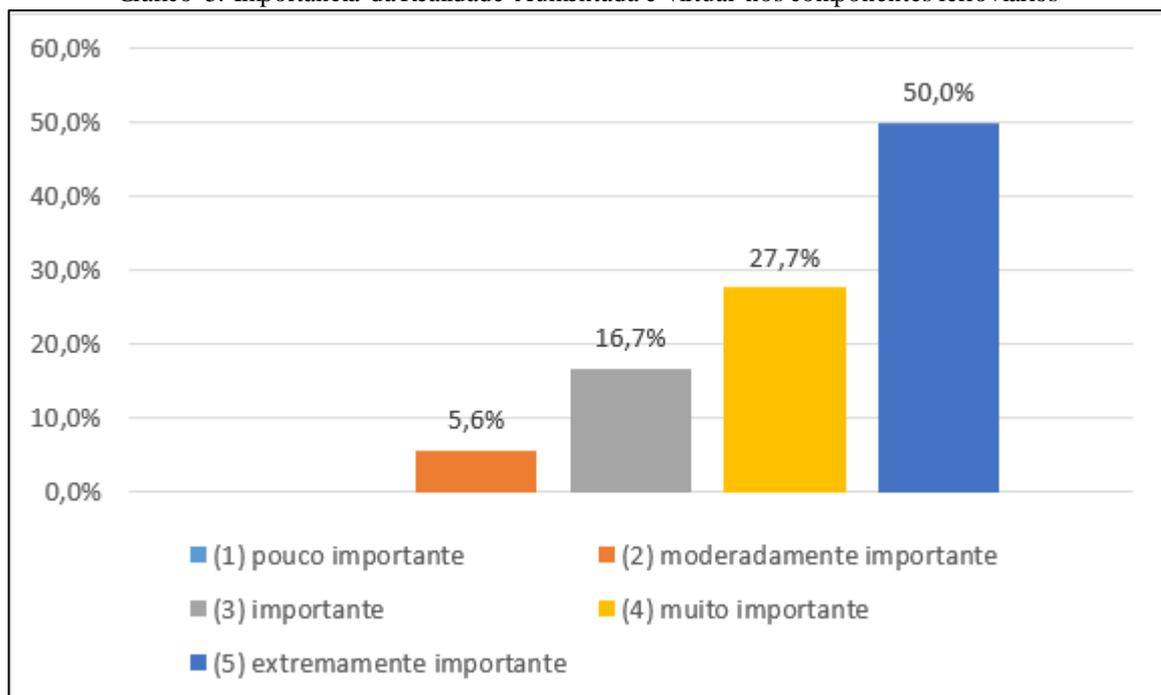
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

No gráfico 5 abaixo, constam as informações no tocante ao grau de importância dada pelos especialistas à tecnologia realidade aumentada e virtual aplicadas aos componentes da superestrutura ferroviária.

Desta forma, 77,7% dos respondentes classificaram a tecnologia realidade aumentada e virtual como muito importante e extremamente importante no que se refere a eficiência e a manutenção dos componentes ferroviários, para 16,7% dos especialistas estas tecnologias têm um grau de importância como moderado e 5,6% classificaram como importante.

A relevância atribuída à realidade aumentada e virtual pelos especialistas demonstra o potencial transformador dessas tecnologias na indústria ferroviária. A capacidade de sobrepor informações digitais ao mundo real, em tempo real, abre um leque de possibilidades para otimizar a eficiência e a manutenção dos componentes da superestrutura e a infraestrutura, como, trilhos, pontes e túneis, permitindo a identificação precisa de falhas (LAITON-BONADIEZ, 2022).

Gráfico 5: Importância da Realidade Aumentada e Virtual nos componentes ferroviários



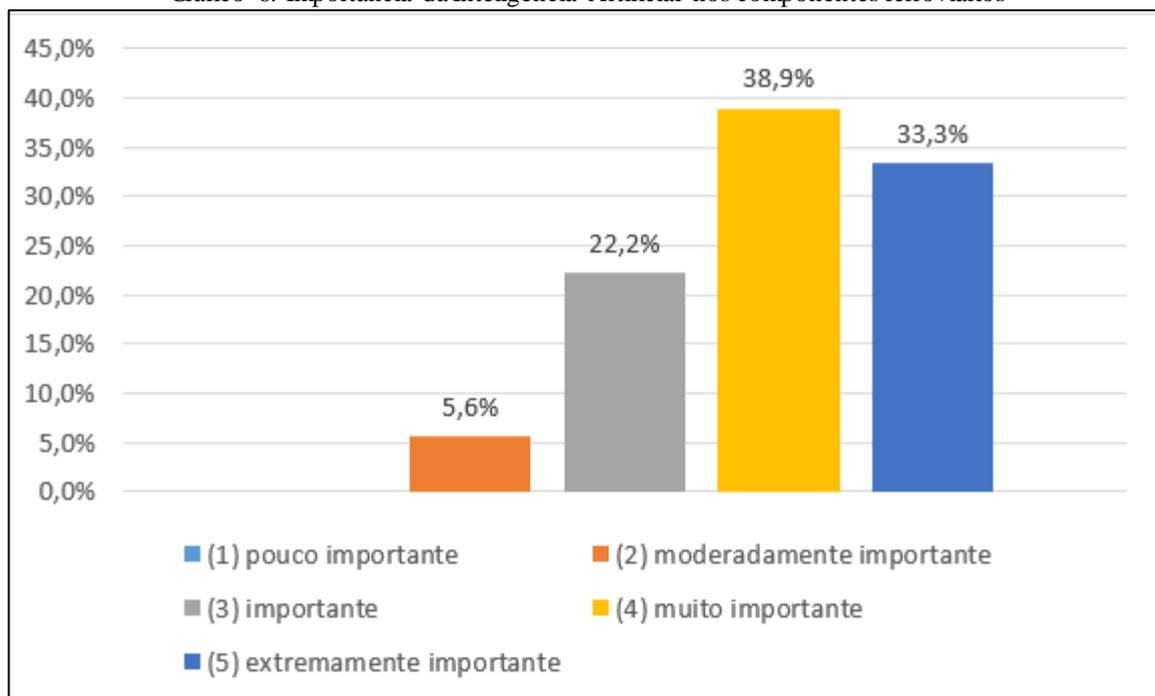
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Quando perguntados sobre a inteligência artificial no que diz respeito à necessidade de aprimoramento e eficiência na manutenção dos componentes ferroviários (gráfico 6 abaixo), 72,2% dos especialistas classificaram como muito importante e extremamente o uso desta tecnologia nos componentes ferroviários, sendo que 27,8% classificaram como importante e moderadamente importante. Nota-se que há uma apreciação por tecnologias que tragam benefícios para o modal ferroviário, bem como, para a eficiência na manutenção de seus componentes.

A avaliação positiva da inteligência artificial pelos especialistas sugere que essa tecnologia representa um divisor de águas na indústria ferroviária. A capacidade da IA de processar grandes volumes de dados, aprender com padrões e tomar decisões (e auxiliar os gestores no processo decisório) autônomas poderá possibilitar melhorias na manutenção dos componentes ferroviários.

Por exemplo, sensores instalados em trilhos, pontes e outros componentes podem coletar dados em tempo real sobre seu estado de conservação, outrossim, algoritmos de IA podem analisar esses dados para identificar padrões e prever falhas antes que elas ocorram, permitindo ações de manutenção preventiva e evitando interrupções inesperadas no serviço ferroviário (PACCHINI et al, 2019 e LAITON-BONADIEZ et al, 2022).

Gráfico 6: Importância da Inteligência Artificial nos componentes ferroviários

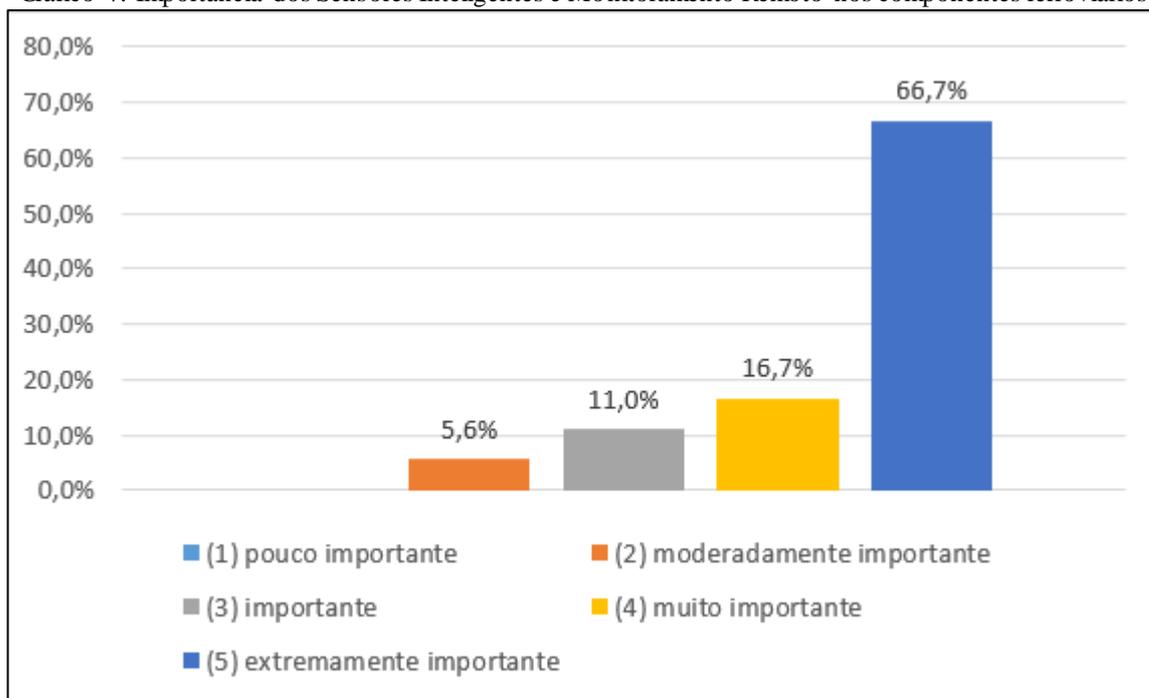


Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Apesar das perguntas anteriores serem bem avaliadas, a que obteve o maior percentual no grau de importância foi a relacionada às tecnologias de Sensores Inteligentes e Monitoramento Remoto, neste sentido, 83,4% (gráfico 7 abaixo) dos especialistas classificaram como muito importante e extremamente a utilização destas tecnologias para o aprimoramento e a eficiência na manutenção dos componentes ferroviários, para 11% estas tecnologias são importantes e para 5,6% são moderadamente importantes.

A preferência dos especialistas pelas tecnologias de Sensores Inteligentes e Monitoramento Remoto demonstra e sugere um potencial dessas soluções na indústria ferroviária. Na literatura, autores como Roveri et al (2015); Qian, Y, et al (2019); Du, Cong, et al (2020); XU, Jinlong; Butler, Liam J.; Elshafie, Mohammed ZEB (2020) em seus trabalhos trazem benefícios na utilização destas tecnologias, tais como: detecção precisa de falhas o que permite ações preventivas e evita acidentes; otimização da programação de manutenção, reduzindo custos e tempo de parada dos trens; maior segurança e confiabilidade nas operações, entre outras.

Gráfico 7: Importância dos Sensores Inteligentes e Monitoramento Remoto nos componentes ferroviários

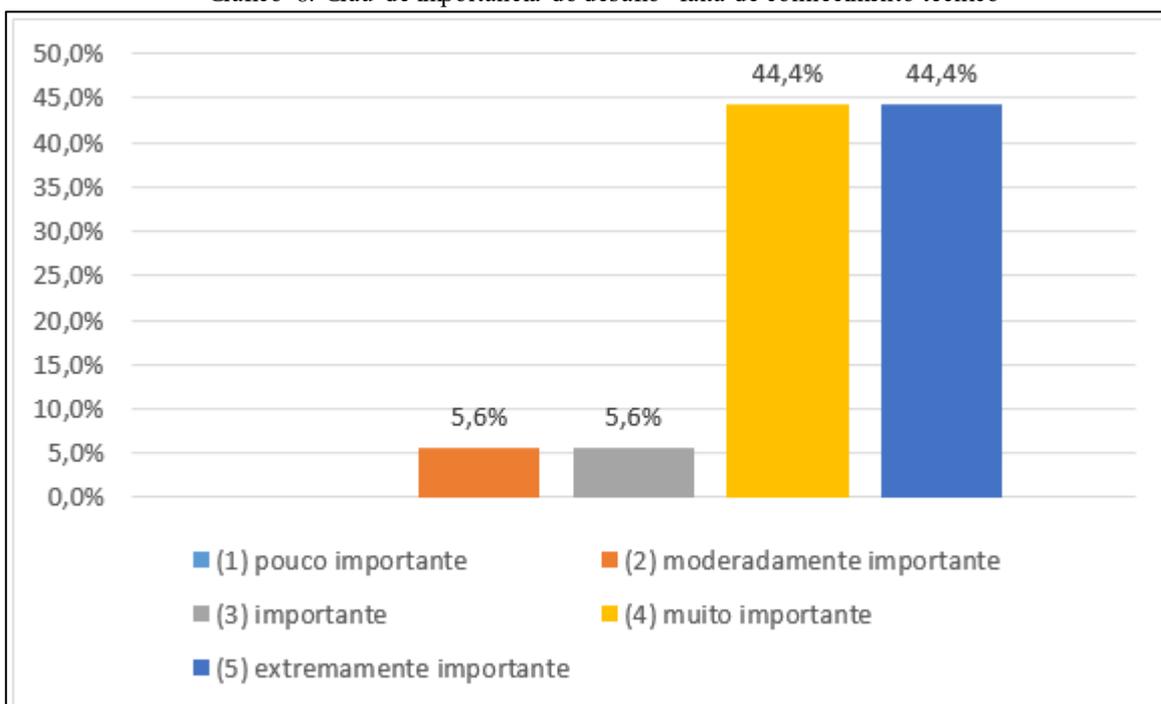


Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A partir destes dados, na próxima seção (5.1.1), serão abordados estudos de casos relacionados a estas tecnologias, retratando quais foram os principais benefícios de sua utilização, o que auxilia no alcance do objetivo específico (demonstrar estudos que comprovem o uso de tecnologias da indústria 4.0 aplicáveis aos componentes da superestrutura ferroviária) e posteriormente na caracterização do artefato. Além disso, todos estes dados do primeiro bloco de perguntas, estão de acordo com o levantamento da literatura contidos na seção 2.5 “Tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 no transporte ferroviário de cargas”.

No segundo bloco de perguntas, foram abordados desafios para que os especialistas julguem o grau de importância na implementação de tecnologias nos componentes ferroviários. Neste sentido, tais desafios passam desde a falta de conhecimento técnico, necessidade de investimento, resistência à mudança e a segurança cibernética. Para 88,8% dos respondentes (gráfico 8 abaixo), a falta de conhecimento técnico é um entrave para a implementação de tecnologias no setor, assim, estes dados sugerem que o setor necessitará de qualificação para a mão de obra, tanto para operar o modal quanto as tecnologias a serem implementadas.

Gráfico 8: Grau de importância do desafio “falta de conhecimento técnico”

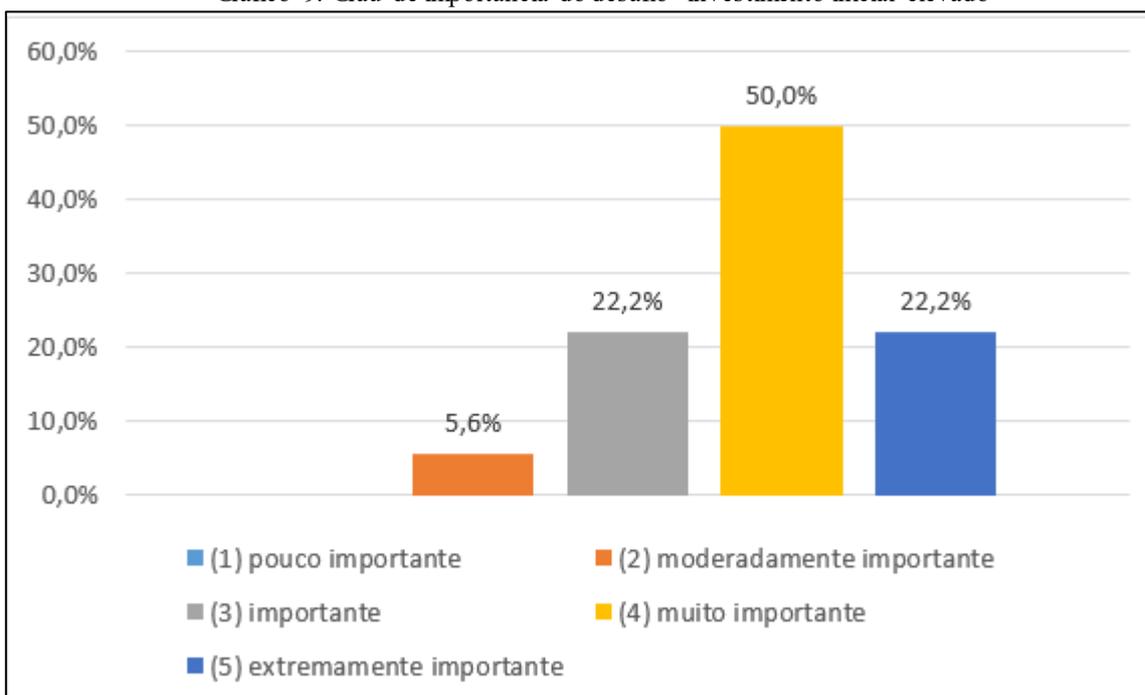


Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Os dados acima, sugerem ainda que há possibilidade da necessidade de aporte financeiro para solucionar o desafio da falta de conhecimento técnico. Neste sentido, o gráfico 9, corrobora os dados citados, quando para os especialistas foi apresentado o desafio de investimento inicial elevado para implementação de tecnologias nos componentes ferroviários.

Para 72,2% dos entrevistados, o investimento inicial elevado é um desafio classificado como muito importante e extremamente importante para o setor, para 27,8% dos respondentes este desafio foi classificado como moderado e importante, desta forma, os profissionais estão certos de que este desafio é um possível entrave na implementação das tecnologias nos componentes ferroviários.

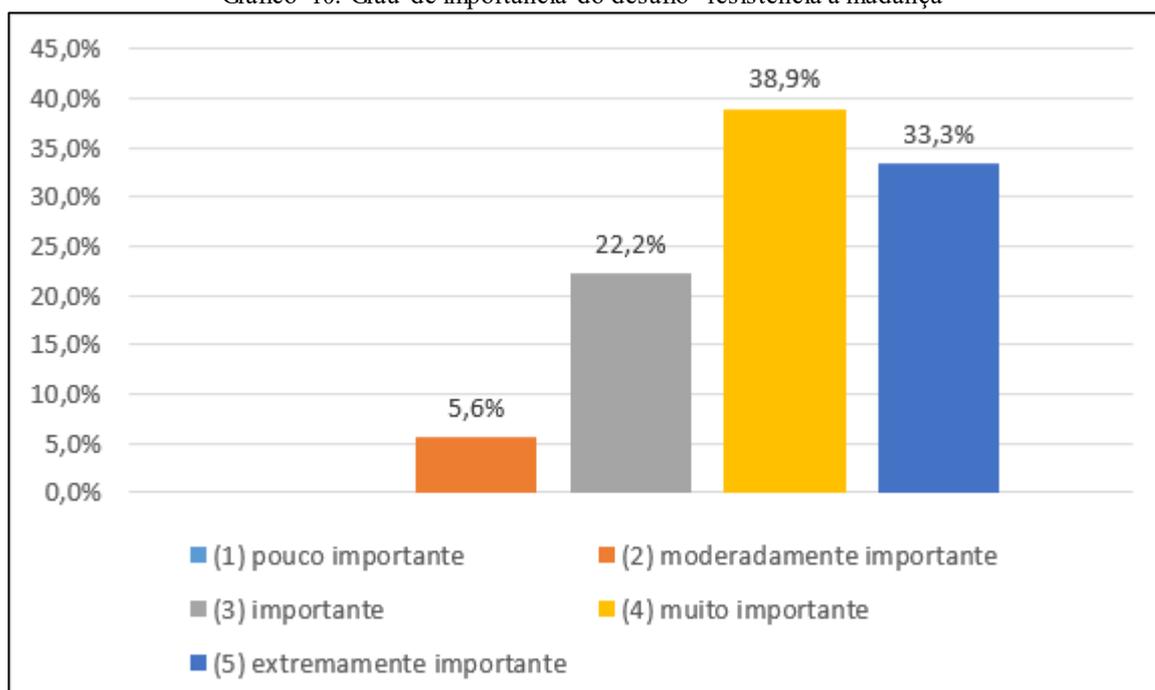
Gráfico 9: Grau de importância do desafio “investimento inicial elevado”



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

O item da entrevista voltado para o desafio resistência à mudança, obteve 72,2% de respostas classificando como muito importante e extremamente importante, o que sugere que o setor ferroviário poderá enfrentar resistências quanto ao rompimento do modelo tradicional frente ao tecnológico, estes dados estão dispostos no gráfico 10 abaixo.

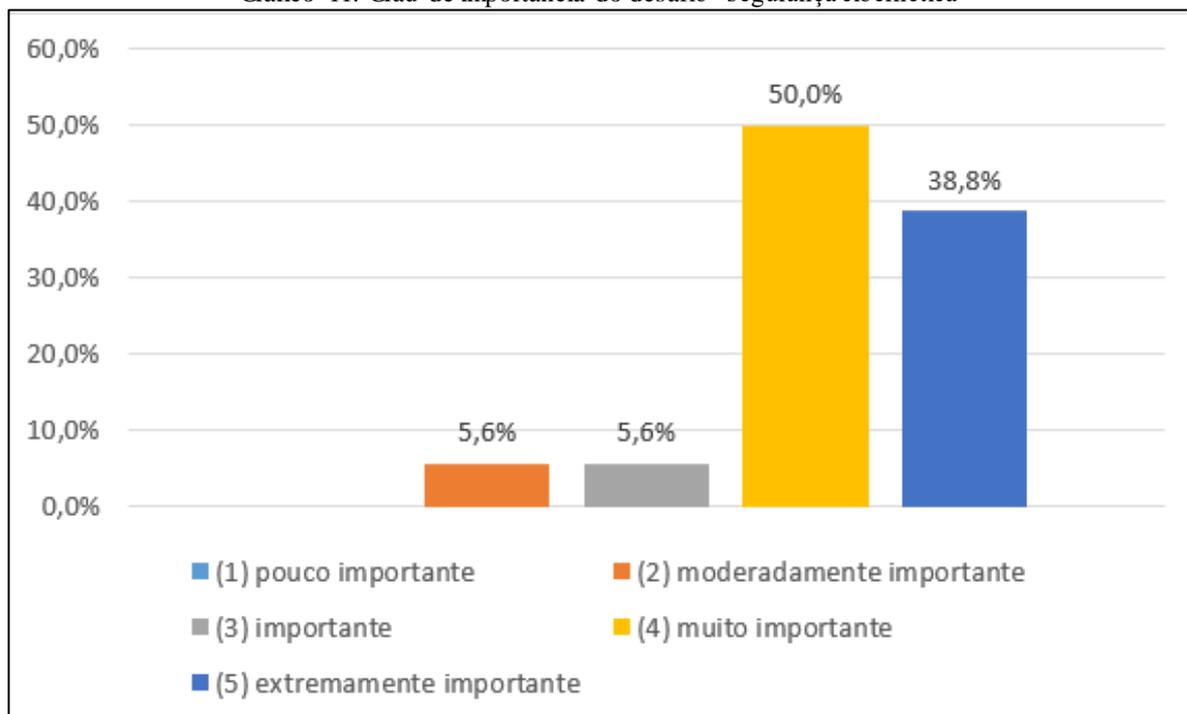
Gráfico 10: Grau de importância do desafio “resistência à mudança”



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

O último item relacionado aos principais desafios que podem ser enfrentados no setor ferroviário na implementação de tecnologias é o de segurança cibernética, neste, 88,8% dos especialistas (gráfico 11 abaixo) classificaram como muito importante e extremamente importante este desafio, o que sugere a necessidade de investimento em segurança tecnológica contra-ataques que possam parar uma operação ferroviária podendo gerar grandes prejuízos às empresas.

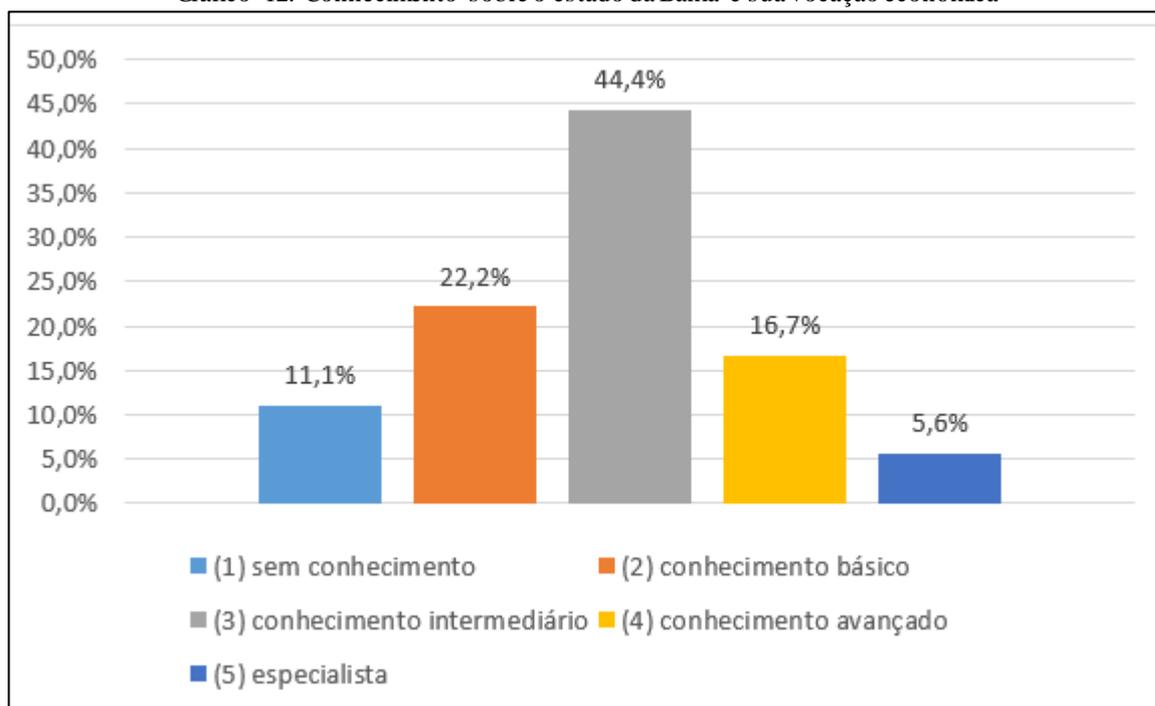
Gráfico 11: Grau de importância do desafio “segurança cibernética”



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

O terceiro bloco de perguntas, de 10 a 17, estão relacionadas ao estado da Bahia, transporte ferroviário e o auxílio à tomada de decisão. O gráfico 12 abaixo, constam os seguintes dados: 66,7% dos respondentes possuem conhecimento no nível intermediário e especialista no que se refere ao estado da Bahia e a vocação econômica em seus municípios, 22,2% conhecimento básico e 11,1% apontaram não ter conhecimento.

Gráfico 12: Conhecimento sobre o estado da Bahia e sua vocação econômica

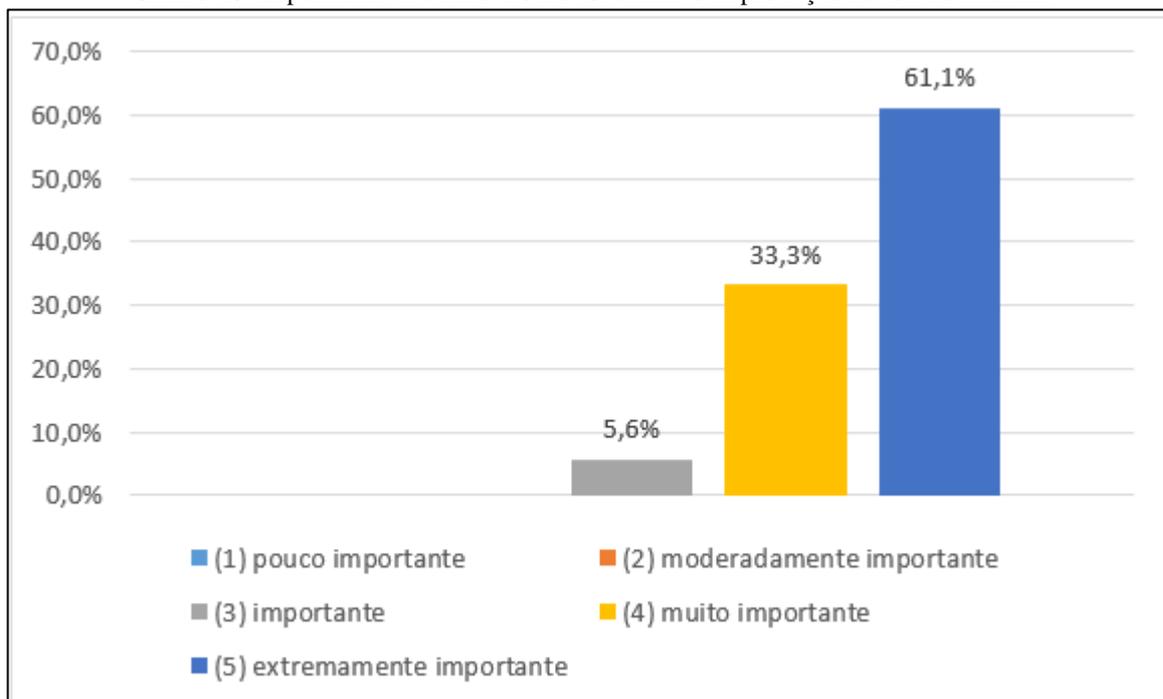


Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Os dados acima citados, trouxeram uma maior importância para a seção 3 “ARRANJO ESPACIAL E ECONÔMICO DO ESTADO DA BAHIA” a qual traz as principais informações sobre o estado e a vocação econômica de seus 417 municípios, dados estes que contribuirão para elaboração do artefato desta dissertação.

Neste sentido, ao perguntar sobre a importância das ferrovias no escoamento da produção no estado, 94,4% dos especialistas (gráfico 13 abaixo) classificaram como muito importante e extremamente importante para o estado utilizar as ferrovias para transportar a produção, o que foi evidenciado na seção 3, na Tabela 8: Principais produtos transportados por ferrovias na Bahia, onde o destaque foi o minério de ferro com mais de 40 milhões de toneladas transportadas, demonstrando através dos dados da literatura e da entrevista a importância das ferrovias.

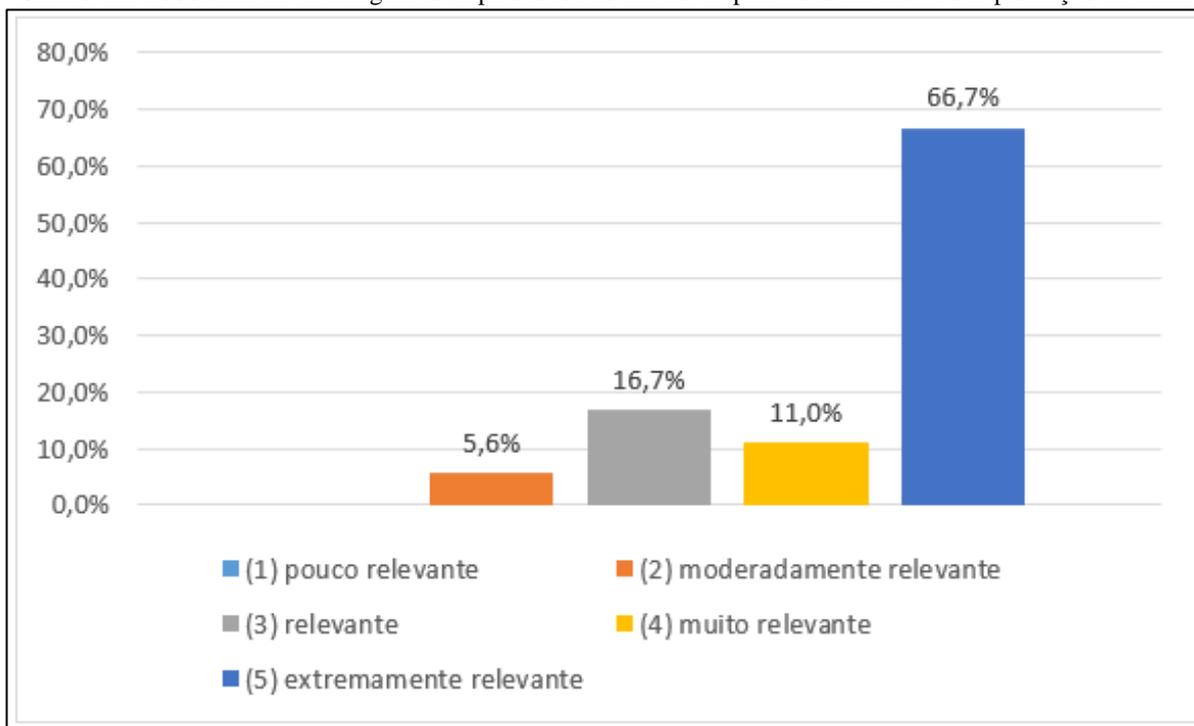
Gráfico 13: Importância das ferrovias no escoamento da produção no estado da Bahia



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Os dados acima apontam para a importância das ferrovias, o que foi percebido nas respostas contidas no gráfico 14 abaixo, quando foi perguntado sobre a importância de integrar as empresas locais à ferrovia para escoamento de sua produção, 77,7% dos especialistas entrevistados classificaram como muito importante e extremamente importante esta integração, o que poderá gerar bons negócios para as empresas, visto que, um hub para integração traz benefícios para o escoamento das cargas no estado.

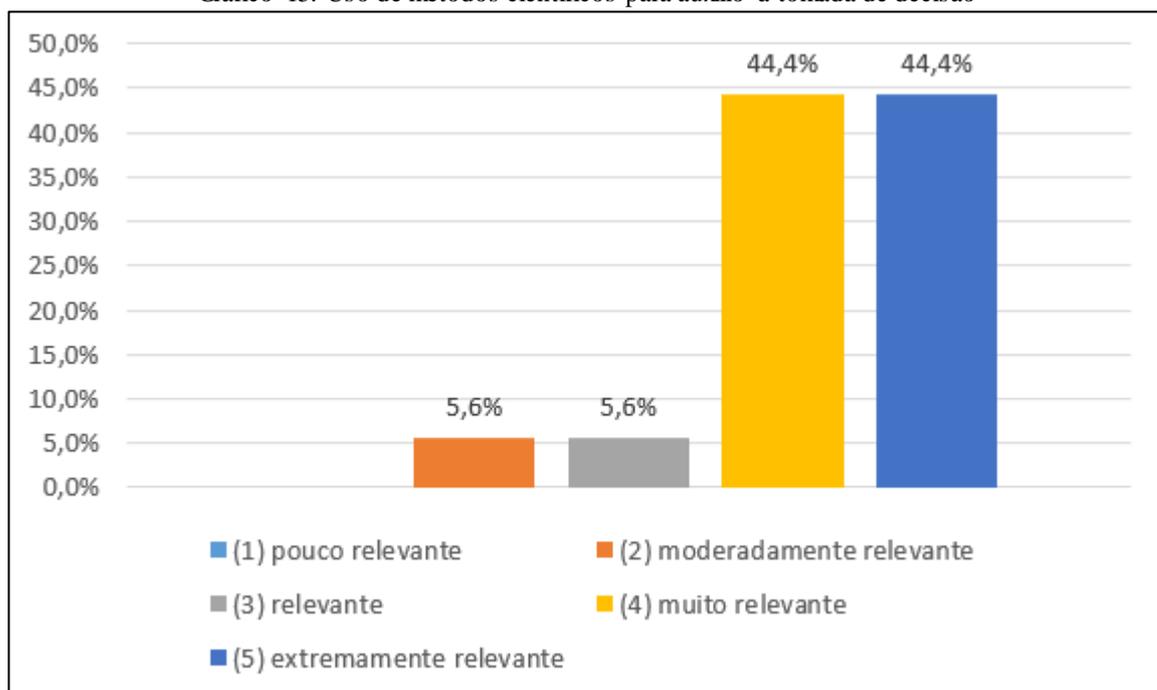
Gráfico 14: Possibilidade de integrar as empresas locais à ferrovia para escoamento de sua produção na Bahia



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Ademais, quando perguntados sobre a importância do uso de métodos científicos para auxílio à tomada de decisão no tocante a instalação de ferrovias e hubs logísticos para integração entre modais, 88,8% dos especialistas, conforme gráfico 15, classificaram como muito importante e extremamente importante que as empresas utilizem de métodos científico como os que foram elencados na seção 2.6.1.1 “Métodos de multicritério para tomada de decisão”, o trabalho abordou de acordo com a literatura métodos que ajudam as empresas no que se refere, por exemplo, a decisão de instalação de nova fábrica, decisões financeiras, estratégicas, entre outras, utilizando equações matemáticas, estatísticas múltiplas, teorias econômicas e programas computacionais, entre outros.

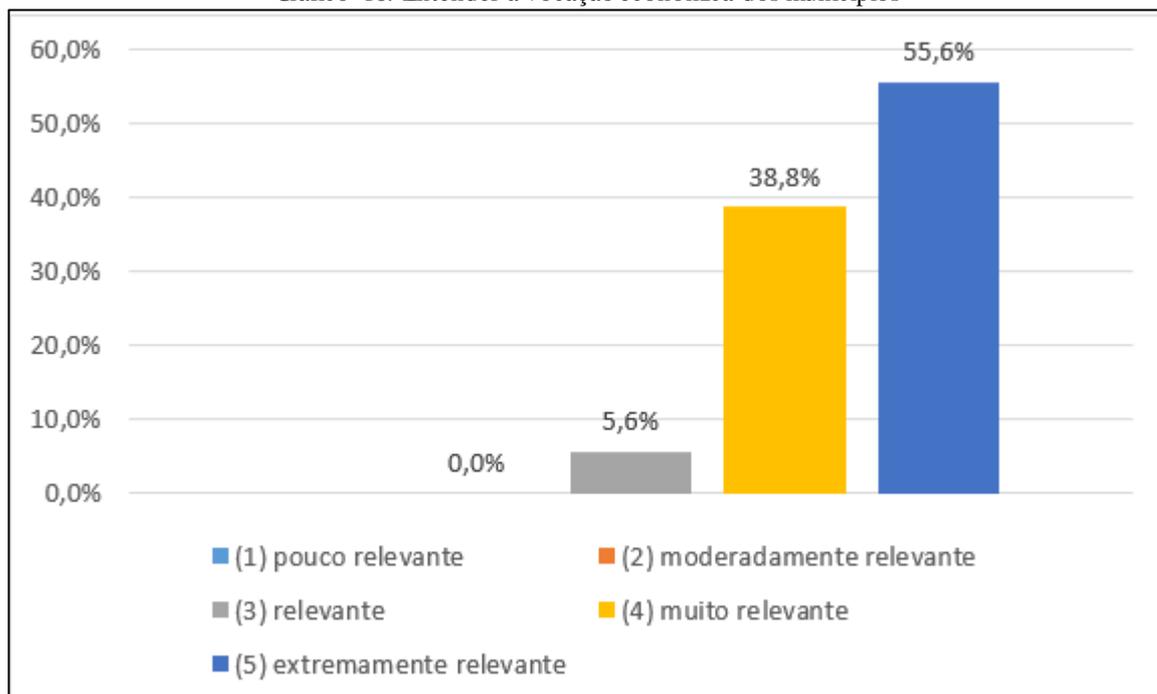
Gráfico 15: Uso de métodos científicos para auxílio à tomada de decisão



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Ao avaliar a relevância na tomada de decisão para a instalação de ferrovias e hubs logísticos a partir do entendimento do que cada município produz, 94,4% dos especialistas classificaram como muito importante e extremamente importante esta informação para auxiliar o processo decisório, conforme gráfico 16 abaixo.

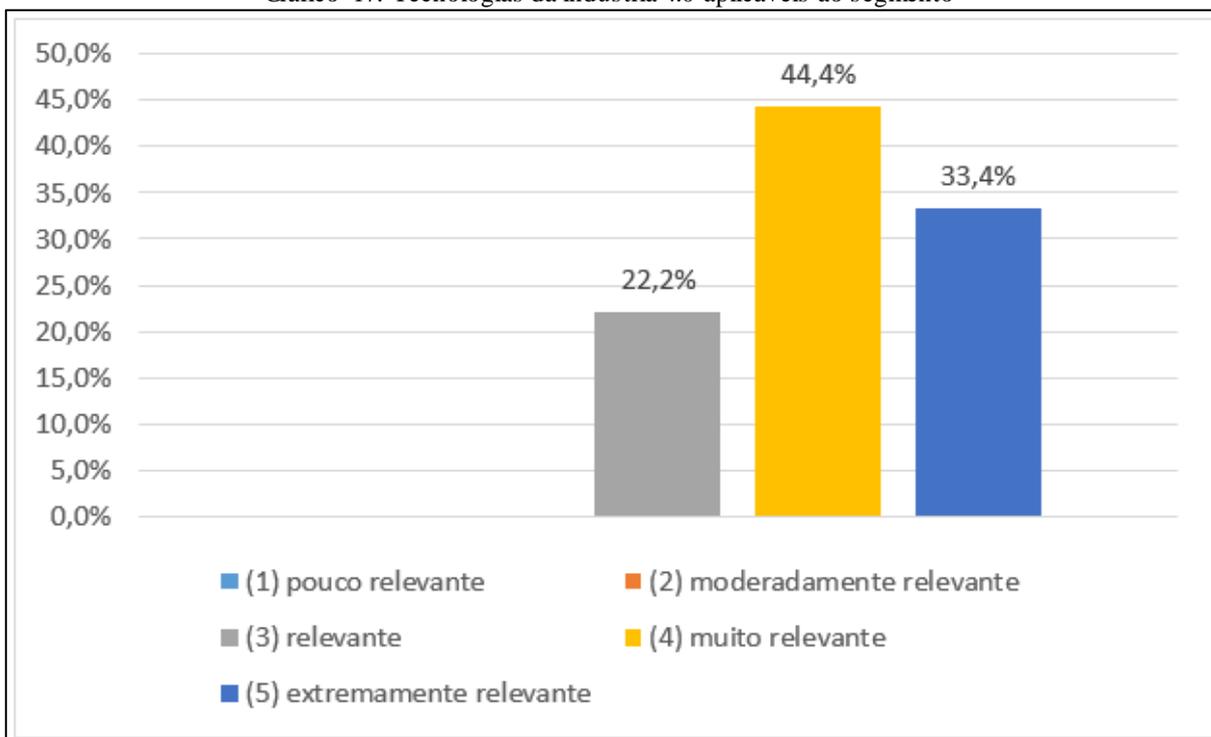
Gráfico 16: Entender a vocação econômica dos municípios



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Ao avaliar na entrevista a possibilidade do uso de tecnologias da indústria 4.0 para auxílio na tomada de decisão no que se refere a instalação de ferrovias e hubs logísticos, 77,8% dos especialistas (gráfico 17 abaixo), classificaram como muito importante e extremamente importante o uso das tecnologias como forma de auxiliar o processo decisório organizacional, colaborando com objetivos propostos nesta dissertação.

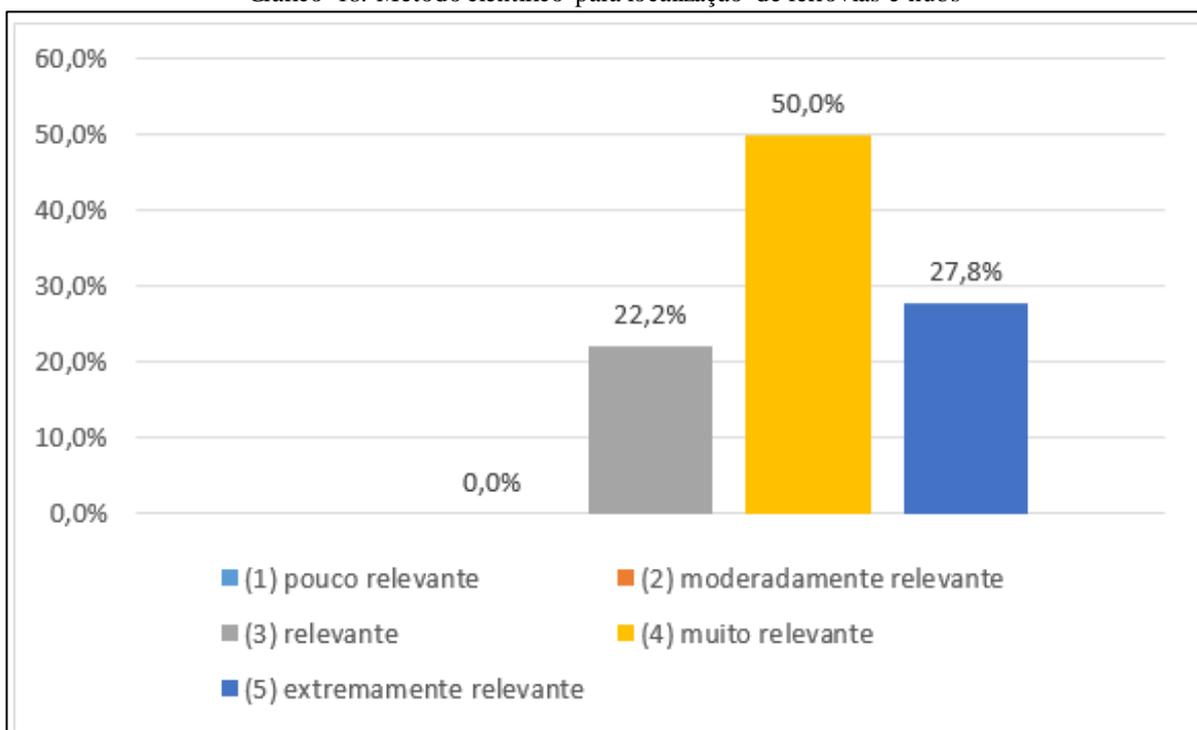
Gráfico 17: Tecnologias da indústria 4.0 aplicáveis ao segmento



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Outrossim, 77,8% dos especialistas (gráfico 18 abaixo) indicaram ainda que é muito importante e extremamente importante a utilização de método científico para auxílio na tomada de decisão quanto a localização de ferrovias e hubs entre os municípios produtores do estado da Bahia, isso sugere a importância deste quesito que foi abordado na seção 2.6.1.2 “Métodos de localização para tomada de decisão”, no levantamento da literatura foi possível conjecturar que estes servem para as empresas decidirem onde posicionar um centro de distribuição, uma estação ferroviária, um hub logístico, buscando reduzir o custo total de transporte e aumentando a eficiência das operações.

Gráfico 18: Método científico para localização de ferrovias e hubs

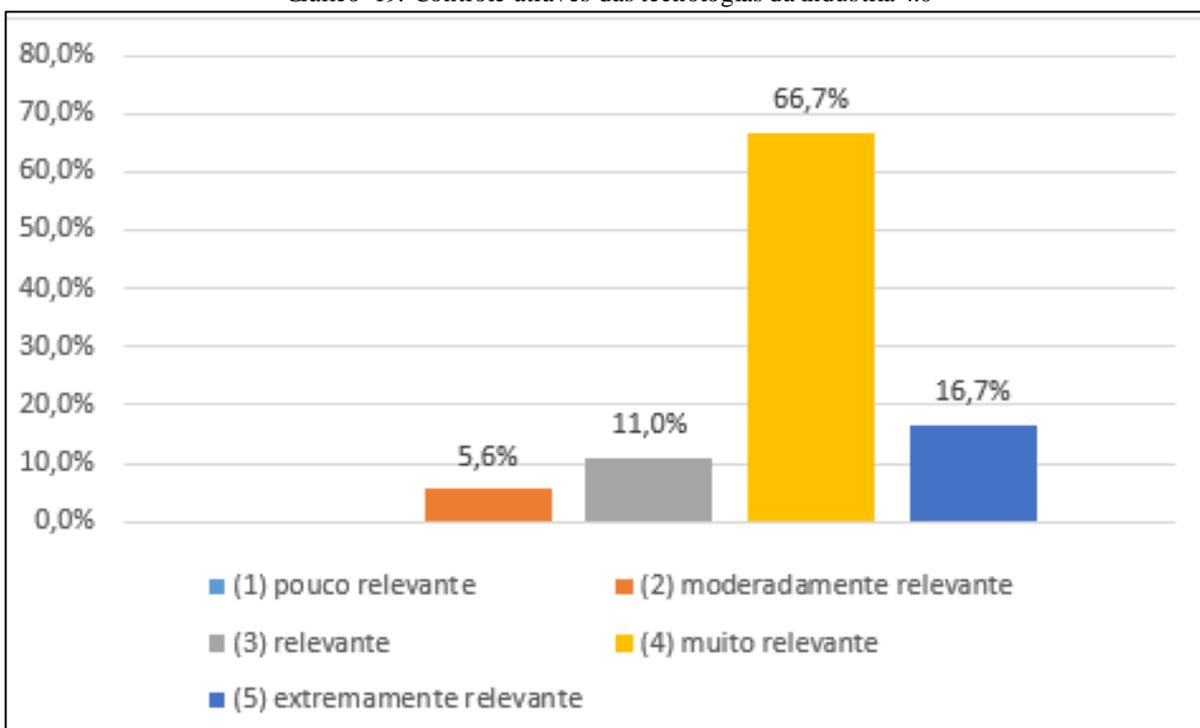


Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Estes dados contidos no gráfico 18, corroboram com o objetivo específico deste trabalho que foi de mapear metodologias de apoio à tomada de decisão para múltiplos critérios, contribuindo inclusive para a particularização do artefato.

A tomada de decisão no que se refere a utilizar tecnologias para essa finalidade, foi avaliada em 83,4% dos especialistas como muito importante e extremamente importante, o que sugere a necessidade do uso de tecnologias da indústria 4.0 para uma melhor assertividade nas operações ferroviárias, estes dados estão dispostos no gráfico 19 abaixo.

Gráfico 19: Controle através das tecnologias da indústria 4.0



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Todas as 17 perguntas desta entrevista foram úteis para a caracterização e elaboração do artefato contido na seção 5.2, visto que, tecnologias, ferrovias e tomada de decisão fazem parte do cerne desta dissertação. A próxima seção trata de estudos de casos que utilizaram sensores inteligentes e monitoramento remoto nos componentes ferroviários e seus principais benefícios.

5.1.1 Síntese de estudos de casos relacionados a sensores inteligentes e monitoramento remoto para componentes da superestrutura ferroviária e métodos multicritérios

Conforme visto na seção 2.5, as tecnologias da indústria 4.0 estão cada vez mais sendo disseminadas, a literatura é vasta em estudos de sua aplicabilidade que perpassa por vários segmentos e o de ferrovias não é diferente. A era da Indústria 4.0 vem se consolidando como uma revolução na forma como os setores produtivos se comportam, seus impactos ultrapassam os limites das fábricas e alcançam toda a sociedade.

A integração entre as tecnologias da indústria 4.0 e o setor ferroviário oferece oportunidade de otimizar a logística ferroviária, bem como a segurança das operações e o aumento da competitividade do setor frente ao modal rodoviário.

Ao compreender como as tecnologias da Indústria 4.0 se integram aos diferentes

elementos da superestrutura ferroviária, as partes interessadas (empresas e governos) podem tomar decisões estratégicas que melhoram a eficiência operacional e potencializam todo setor ferroviário, colocando-o como vital para a economia regional. Por meio dessa relação (tecnologias e componentes da superestrutura ferroviária) torna-se possível visualizar um cenário em que o setor ferroviário poderá dar um salto para uma nova era de desempenho e participação no segmento de transporte de cargas no estado da Bahia.

Nesta seção, serão apresentados os resultados encontrados na literatura relacionados a cases no tocante a implementação de tecnologias da indústria 4.0 sensores inteligentes e monitoramento remoto, respondendo a um dos objetivos específicos desta dissertação que é **“demonstrar estudos que comprovem o uso de tecnologia da indústria 4.0 aplicáveis aos componentes da superestrutura ferroviária”**.

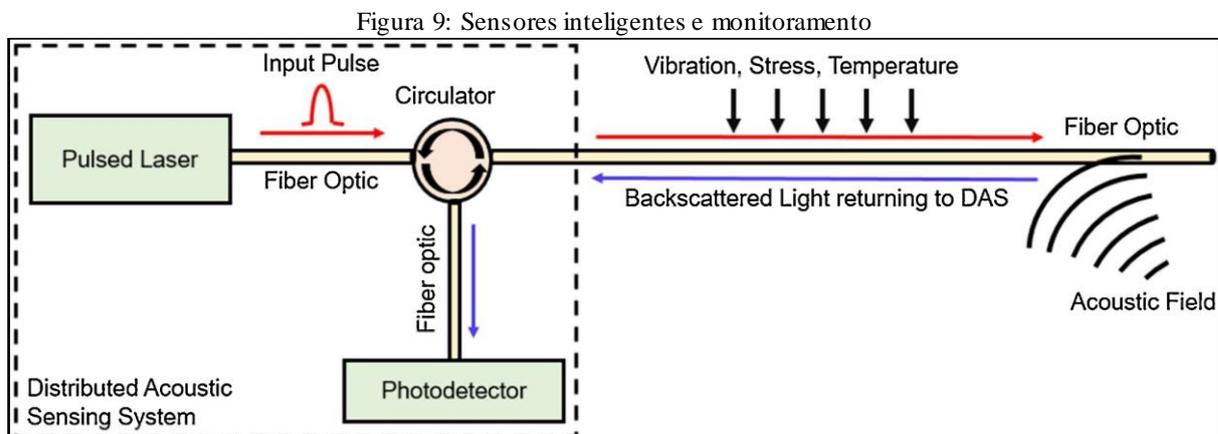
A função de um sensor é a medição e/ou monitoramento para auxílio à tomada de decisão, haja vista, que ele é um dispositivo que responde a estímulos físicos como, temperatura, luz, calor, pressão, etc., Roveri et al. (2015) e a partir disso, transmite um sinal para um controlador que recebe esses sinais, toma decisões e transmite comandos aos atuadores para executar ações específicas, como por exemplo, numa ferrovia com sistema de sensoriamento, o sensor, ao identificar a chegada de um trem que necessita mudar de direção, aciona o atuador responsável pelo aparelho de mudança de via, este aciona o mecanismo de mudança de via alterando a direção dos trilhos para colocar o trem na direção correta.

Outrossim, os sistemas mais modernos trabalham com controle distribuído ou ambientes em rede, que significa a capacidade dos sensores e atuadores de se comunicarem diretamente entre si, permitindo respostas mais rápidas e comportamentos adaptativos nos sistemas. Na literatura existem diversos trabalhos publicados sobre a utilização de sensores e monitoramento remoto para auxílio à tomada de decisão, os quais trazem benefícios discutidos a seguir.

No trabalho de Du, *et al* (2020) os autores analisaram o estado da arte atual das tecnologias de detecção/monitoramento de fibra óptica, incluindo os princípios básicos de vários sensores de fibra óptica, novas metodologias computacionais e de detecção e aplicações práticas para monitoramento de infraestrutura e superestrutura ferroviária, para monitorar temperatura, tensões, deslocamentos, medições de deformação, velocidade, massa e localização do trem, contagem de eixos, imperfeições das rodas, assentamentos ferroviários, desgaste e avaliação da saúde de pontes e túneis ferroviários.

Na figura 9 abaixo, mostra sensores de fibra óptica e as informações que são coletadas a partir da instalação e monitoramento destes, assim, a empresa terá em tempo real as condições

da infraestrutura e superestrutura ferroviária, podendo assim tomar decisões no tocante a manutenção preditiva e preventiva, reduzindo a necessidade da manutenção corretiva.



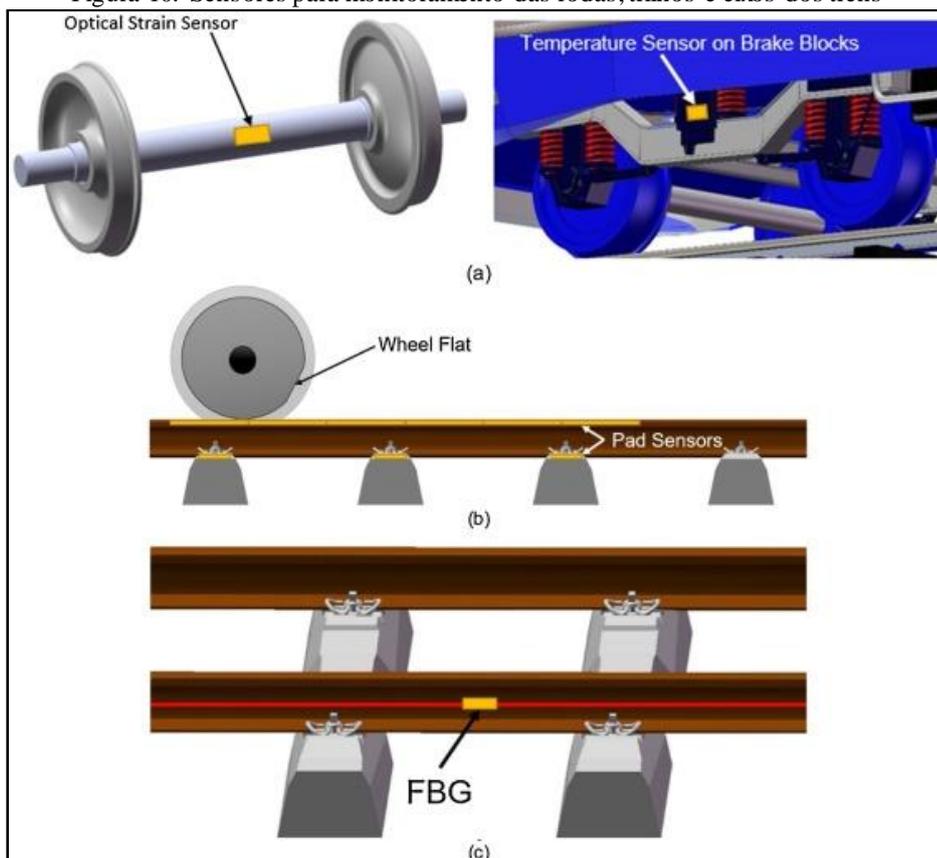
Fonte: Du, et al (2020)

Estes sensores baseados em fibra ótica servem para o monitoramento do desempenho a longo prazo da infraestrutura e a superestrutura ferroviárias, estes são cruciais para a medição em tempo real e a avaliação a longo prazo de possíveis riscos, melhorando a sua segurança e confiabilidade através da detecção precoce de danos para manutenção e reparação, a fim de evitar acidentes (DU, et al. 2020).

Apesar disso, os próprios autores afirmam ainda que um dos principais desafios enfrentados em suas aplicações em campo é a instalação, os quais incluem fibras nuas quebradas e fibras encamisadas com baixa sensibilidade e deformação, dentre outros, mas os resultados das aplicações têm superados os desafios, relatam os autores.

ROVERI *et al.* (2015) *apud* DU, *et al.* (2020) propuseram a utilização de sensores para monitorar a rugosidade das rodas dos trens (Figura 10: 'Sensores para monitoramento das rodas, trilhos e eixos dos trens'). A tecnologia permite a medição da força de impacto através da estimativa do pico da força de contato, possibilitando a medição com precisão do tamanho da roda danificada a uma velocidade de até 90 km/h.

Figura 10: Sensores para monitoramento das rodas, trilhos e eixos dos trens

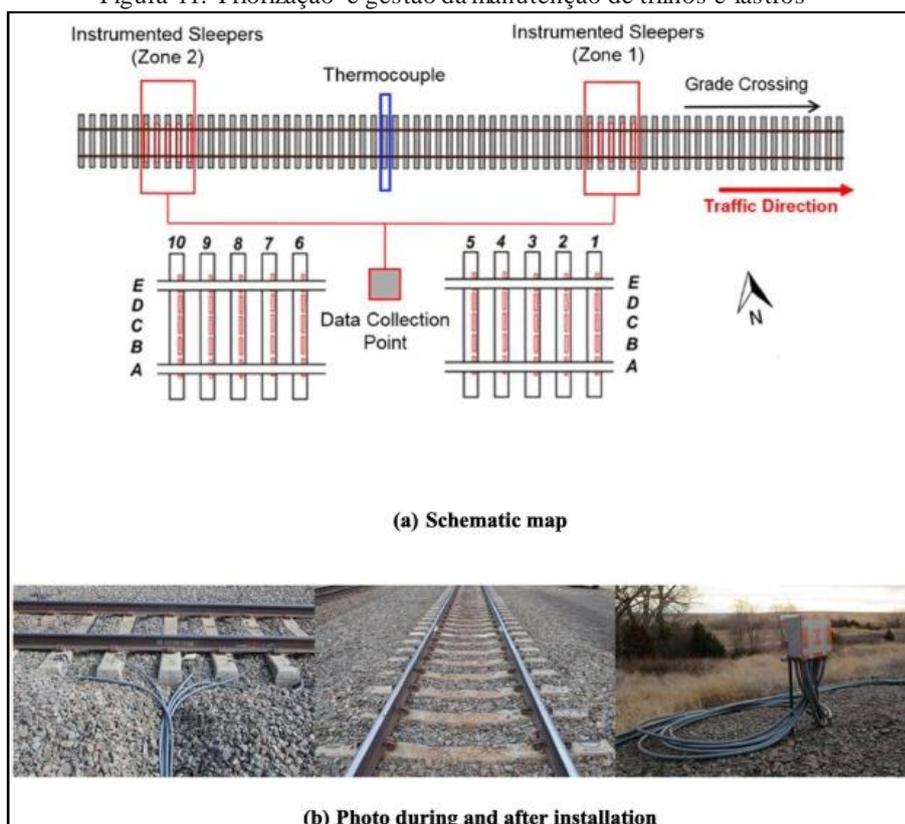


Fonte: Du, et al, (2020).

A tecnologia mostrada acima, foi testada durante seis meses em uma ferrovia em Milão, importante centro ferroviário da Itália. Os resultados do monitoramento indicaram alta precisão, comprovando o potencial da tecnologia para a manutenção preditiva de sistemas ferroviários.

QIAN, *et al.* (2019) estudaram a priorização e gestão da manutenção de trilhos e lastros (figura 11 abaixo) através de quatro elementos oriundos da indústria 4.0: monitoramento através de sensores, computação em nuvem, tomada de decisão e solução de problemas. A partir disso, conseguiram monitorar as condições dos suportes de lastro desenvolvido como uma ferramenta auxiliada por computador para quantificar a condição do lastro na interface dormente-lastro. Os pesquisadores conseguiram validar em laboratório e em seguida foi implementado em campo, numa ferrovia de carga nos Estados Unidos para monitorar continuamente a distribuição da pressão do lastro sob travessas de concreto em tempo real sob condições operacionais.

Figura 11: Priorização e gestão da manutenção de trilhos e lastros



Fonte: Qian, *et al* (2019).

O sistema automático de avaliação das condições do suporte de lastro e trilhos pode auxiliar a indústria ferroviária na otimização dos ciclos de revestimento do lastro, aumentando a segurança e reduzindo os custos operacionais, afirmam QIAN, *et al* (2019).

Colaborando, o trabalho dos autores Xu, Butler e Elshafie (2020), utilizou sensores inteligentes com fibra óptica em testes laboratoriais em escala real de um dormente auto-sensorizado apoiado em lastro. O foco principal do estudo destes autores foi investigar se um dormente com autodeteção também poderia ser usado para estimar a carga do assento do trilho, detectar fissuras e identificar assentamentos diferenciais de lastro.

Os autores citados avaliaram ainda a capacidade dos sensores nos dormentes detectar danos, fissuração do concreto e perda de sustentação do lastro, ademais, a partir dos testes nos laboratórios, os resultados experimentais revelaram a eficácia e robustez do sistema de detecção para continuar a fornecer medições de deformação dinâmica confiáveis muito além da capacidade de carga final do dormente estudado. Todos estes dados fornecem informações críticas de apoio à decisão para gestores e operadores ferroviários (XU, BUTLER e ELSHAFIE, 2020).

Outrossim, a empresa RUMO Logística, uma das maiores operadoras de ferrovias no Brasil, vem adotando desde de 2018 a Inteligência Artificial em suas linhas ferroviária, o que

através de sensores na empresa chamados de “Detecção de Trilhos Quebrados (DTQ)” trazem maior assertividade de identificação de problemas na via.

Em sua primeira fase, a iniciativa consistiu na instalação de um aparelho em diversos pontos da malha ferroviária e, com ou sem trem na via, as condições dos trilhos eram repassadas ao Centro de Monitoramento de Redes (NOC). Quando era identificada uma anomalia, os maquinistas de todos os trens eram informados em tempo real, eliminando o risco de descarrilamento (RUMO, 2023).

A partir da implantação da IA, a RUMO Logística obteve os seguintes benefícios:

- otimizou a detecção de trilhos quebrados; reduziu os índices de alarmes falsos para trilhos quebrados;
- aumentou a eficiência da operação; reduziu as notificações que causavam a parada do trem ou a necessidade de restrição de velocidade.

A empresa afirma ainda que, após a conclusão dos testes, 60% dos aparelhos DTQs instalados em toda a malha receberam a atualização e entraram em fase de operação assistida, a empresa opera 12 terminais de transbordo, seis terminais portuários e administra cerca de 14 mil quilômetros de vias férreas no Brasil, sua base de ativos é formada por 1.400 locomotivas e 35 mil vagões (RUMO, 2023).

Além dos estudos sobre sensores inteligentes, esta seção também traz autores que estudaram métodos de localização e multicritério para auxílio à tomada de decisão, colaborando com o alcance dos objetivos da dissertação. ISLER, ASAFF e MARINOV (2020) estudaram um método de localização, o Sistema de Informações Geográficas (SIG), o qual traz um conjunto de ferramentas que permite a integração, análise e visualização de dados georreferenciados.

A logística é utilizada para planejar rotas de transporte, otimizar entregas e analisar a eficiência da cadeia logística, no estudo de caso citado, foi utilizado para tomada de decisão sobre a localização de rede ferroviária, utilizando como objeto de estudo o estado de Santa Catarina, Sul do Brasil.

O estudo identificou, de acordo com os autores Isler, Asaff e Marinov (2020), a quantidade de trens para atender as demandas no estado, além de identificar e analisar as ligações que teriam um número mínimo de trens diários circulando. Desta forma, propuseram uma rede ferroviária geoestratégica para serviços de carga, desenhada com o objetivo de atender às necessidades futuras de transporte de carga com conexão multimodal no estado de Santa Catarina.

DA ROCHA (2023) realizou um estudo de caso numa empresa do segmento de e-

commerce e utilizou a técnica de *Facility Location* para otimização da localização e alocação de produtos oriundos do e-commerce. Com os resultados obtidos na aplicação da técnica, a empresa alcançou em média uma otimização de 39,1% na distribuição dos itens dos CDs (Centro de Distribuição) para os clientes, outro resultado desta aplicação foi a ausência de falhas na geração de relatórios no dia a dia da operação.

GARCIA e ORTIZ (2020) realizaram um estudo de caso com aplicação de técnica de *Facility Location* para otimização na distribuição de água através de carro-pipa. Após a aplicação do método, o trabalho mostrou uma economia de recursos no longo prazo na casa de 31,21%, através da sugestão de construção de quatro estações de tratamento de água para redução do tempo de deslocamento dos caminhões.

SOUZA, OLIVEIRA e SOUZA (2023) realizaram um estudo de caso com a utilização do método multicritério (Análise Hierárquica de Processos (AHP)) que se caracteriza por uma estruturação hierárquica e abordagem multicritério para auxiliar na tomada de decisões complexas. Através da decomposição e síntese das relações entre os critérios, o AHP facilita a priorização de indicadores e a obtenção de uma resposta única de medição de desempenho, de forma mais abrangente e robusta, em conjunto com técnicas de geoprocessamento, que referem-se a métodos e ferramentas utilizados para coletar, armazenar, processar, analisar e visualizar dados geoespaciais.

Estes autores realizaram o estudo na região de MATOPIBA, que é um acrônimo formado pelas iniciais dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. O trabalho avaliou a combinação de critérios locais considerando aspectos ambientais e de intermodalidade para identificar regiões mais adequadas para a instalação de armazéns graneleiros do tipo subterminal.

A aplicação dos métodos, afirmam os autores, permitiu classificar as regiões candidatas para a instalação de armazéns. Os resultados indicaram três grandes áreas adequadas para a armazenagem de grãos, que juntas representam 12% da área de estudo. A partir da combinação de AHP e técnicas de geoprocessamento, foi possível considerar critérios de infraestrutura, ambientais e socioeconômicos que promoveram a racionalização e o direcionamento dos investimentos, excluindo as áreas de conservação, áreas indígenas e quilombolas, bem como, a sugestão da intermodalidade para melhor escoamento da produção regional (SOUZA, OLIVEIRA e SOUZA, 2023).

CHAVES e REIS (2022) desenvolveram um estudo utilizando o método AHP FUZZY para a tomada de decisão quanto a comparação entre os diferentes tipos de dormentes e as

técnicas mais recentes adotadas no mercado mundial, avaliando os dormentes (madeira, concreto, aço, plástico e laje). A lógica Fuzzy lida com a representação de informações imprecisas ou subjetivas, podem ser representadas por valores que variam entre completamente verdadeiro (1) e completamente falso (0), com uma gama de valores intermediários para expressar graus de verdade ou falsidade. No contexto do AHP Fuzzy, essa abordagem é aplicada às comparações entre critérios e alternativas em uma estrutura hierárquica.

Os autores afirmam ainda que a comparação foi com o objetivo de indicar qual seria o melhor dormente a ser utilizado em futuros investimentos na malha férrea brasileira, utilizando os seguintes critérios, (Custo/km aquisição; Vida Útil; Manutenção Km/Ano; Ruído (Perturbação) e Impacto Ambiental).

Após a aplicação do método AHP Fuzzy, Chaves e Reis (2022) concluíram que o dormente de laje, com o maior score (0,206), se destacou como a melhor alternativa para futuros investimentos na malha ferroviária, em virtude dos critérios de custo, vida útil, manutenção, ruído e impacto ambiental.

A tabela 13 abaixo traz um resumo dos trabalhos abordados nesta seção, contendo os autores, tecnologias utilizadas e o contexto de utilização, simulação computacional ou implementação em ambiente real.

Tabela 13: Síntese dos estudos de casos

Autores	Tecnologias	Contexto da utilização		Estudo realizado no Brasil?
		Simulação	Implementação em ambiente real	
DU, et al (2020).	Sensores inteligentes e monitoramento remoto com fibra óptica	X		Não
ROVERI et al, 2015 apud DU, et al (2020).	Sensores inteligentes e monitoramento remoto	X	X	Não
QIAN, et al (2019).	Sensores inteligentes e computação em nuvem	X	X	Não
XU; BUTLER e ELSHAFIE, (2020).	Sensores inteligentes e monitoramento remoto com fibra óptica	X		Não
RUMO (2023).	Inteligência Artificial em suas linhas ferroviária, o que através de sensores na empresa chamados de “Detecção de	X	X	Sim

Trilhos Quebrados (DTQ)

ISLER; ASAFF; MARINOV, (2020).	Sistema de Informações Geográficas (SIG)	X		Sim
SOUZA; OLIVEIRA; SOUZA, (2023).	Análise Hierárquica de Processos (AHP) e técnicas de geoprocessamento	X		Sim
CHAVES e REIS (2022).	Estudo do método AHP FUZZY para a tomada de decisão quanto a comparação entre os diferentes tipos de dormentes	X		Sim
DA ROCHA (2023)	Estudou método de Facility Location para otimização de entregas de produtos do e-commerce	X	X	Sim
GARCIA e ORTIZ (2020)	Realizaram um estudo de caso com aplicação do método Facility Location para otimização da entrega de água através de carros pipas	X		Sim

Fonte: Autoria própria.

A tabela acima mostra dez estudos de casos extraídos da revisão da literatura utilizada nesta dissertação a qual utilizou-se de 117 trabalhos (dados contidos na tabela 11), estes foram escolhidos a partir do resultado da entrevista com os especialistas. Assim, dos dez estudos de casos utilizados nesta síntese, quatro realizaram simulação e aplicação em ambiente real, o que representa 40% da amostra, outro dado relevante nesta síntese é que 60% dos estudos são de origem nacional corroborando para a relevância da pesquisa.

Outros trabalhos estão relacionados na tabela 14 (Tecnologias da indústria 4.0 aplicáveis aos principais componentes da superestrutura ferroviária) próxima seção e nesta, constam tecnologias que em conjunto com sensores inteligentes podem possibilitar valiosos benefícios para as organizações, todos estes dados contribuíram para o alcance dos objetivos desta dissertação.

5.1.2 Demais Tecnologias da indústria 4.0 aplicáveis aos principais componentes da superestrutura ferroviária

Complementando a seção anterior, a tabela 14, traz outras tecnologias da indústria 4.0 e principais aplicabilidades nos componentes da superestrutura ferroviária, bem como, os autores que utilizaram estas abordagens.

Desta forma, entender como cada componente da superestrutura poderá ser impactado de maneira positiva no que se refere a utilização das tecnologias da indústria 4.0, espera-se mais segurança nas operações, maior pontualidade, integração das informações das regiões produtivas com as empresas que operam as ferrovias, permitindo uma transformação do setor e construindo um ecossistema inteligente e competitivo.

Tabela 14: Tecnologias da indústria 4.0 aplicáveis aos principais componentes da superestrutura ferroviária

Tecnologias habilitadoras 4.0 e elementos tecnológicos	Componentes da superestrutura ferroviária	Síntese	Referências
Big Data Internet das Coisas (IoT) Código QR; Drone RFID Sistema ultrassônico de falha	Trilhos	As tecnologias citadas são responsáveis por informações sobre a saúde dos trilhos, bem como, gerar a previsibilidade e a rastreabilidade para a tomada de decisão quanto a manutenção e eventuais substituições, características de desgaste, evitando acidentes e custos desnecessários.	LEDERMAN, <i>et al</i> , 2017; BUSTOS, <i>et al</i> , 2021; DU, Cong, <i>et al</i> , 2020; WANG, Longqi; ZHANG, Yao; LIE, Seng Tjhen, 2017; GUO, H.-M.; WANG, Q.; WANG, W.-J.; GUO, J.; LIU, Q.-Y.; ZHU, M.-H, 2015; AI, B, <i>et al</i> , 2020; ENSCO, Inc. 2023.
Big Data Internet das Coisas (IoT) Impressão 3D Simulação Computacional Sistema de medição de restrição	Dormentes	Sensores inteligentes são inseridos nos dormentes para coleta e análise de dados relacionados às condições físicas, oriundas dos impactos do material rodante como, trincas e outras deformações para evitar acidentes.	QIAN, Y.; DERSCH, MS; GAO, Z.; EDWARDS, JR (2019); JING, G, <i>et al</i> , 2021; XU, Jinlong; BUTLER, Liam J.; ELSHAFIE, Mohammed ZEB, 2020; AI, B, <i>et al</i> , 2020; ENSCO, Inc. 2023.
Big Data Internet das Coisas (IoT) Simulação Computacional Sistema de medição de folga	Lastros	Os estudos apontam a importância na utilização de tecnologias 4.0 e elementos tecnológicos para a composição dos lastros, reduzindo custos e aumentando a eficiência, como sensores para detectar anomalias, programar manutenções e monitorar a compactação e estabilidade do lastro.	QIAN, Y.; DERSCH, MS; GAO, Z.; EDWARDS, JR (2019); XU, Jinlong; BUTLER, Liam J.; ELSHAFIE, Mohammed ZEB, 2020; LIU, S.; HUANG, H.; QIU, T, 2015; LIU, S.; QIU, T.; QIAN, Y.; HUANG, H.; TUTUMLUER, E.; SHEN, S, 2019; ZENG, K, <i>et al</i> , 2019; AI, B, <i>et al</i> , 2020; ENSCO, Inc. 2023.
Big Data Internet das Coisas (IoT) Impressão 3D Simulação Computacional Sistema de imagem de componentes	Itens de fixação e Aparelhos de mudança de via	Sensores inteligentes são inseridos nos itens de fixação e nos aparelhos de mudança de via, para gerar previsibilidade de falhas, desgastes, ruptura, emitir sinal para manutenção e mudança na rota do trem, se for necessário substituir esses itens ou aparelhos, a tecnologia de impressão 3D pode ser empregada, bem como, a geolocalização para pronto atendimento em caso de acidentes, ou qualquer outra emergência.	GAO, X, <i>et al</i> , 2021; TOTH, A, D, <i>et al</i> , 2022; TOTH, A. D.; VILAKAZI, S, 2019; AI, B, <i>et al</i> , 2020; GAO, M, <i>et al</i> , 2019; ZHOU, T, <i>et al</i> , 2019; ENSCO, Inc. 2023.

Fonte: Autoria própria.

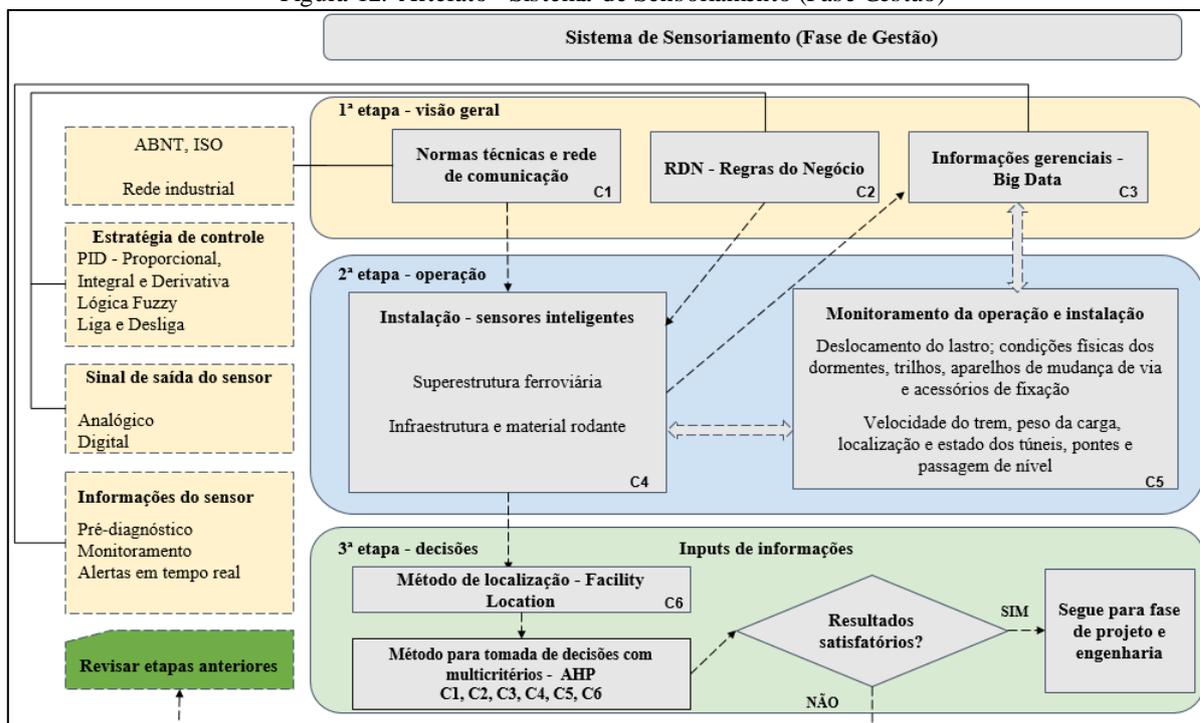
5.2 Caracterização do Artefato - Sistema de Sensoriamento (Fase Gestão)

Este artefato é resultado do percurso metodológico adotado e dos “insights” obtidos através a entrevista com os especialistas no setor ferroviário. A partir dessas constatações, foi apontada a tecnologia com o maior percentual de avaliações positivas (83,4%) dentre as opções apresentadas para o modal ferroviário, que consiste em sensores inteligentes e monitoramento remoto. Adicionalmente, métodos multicritério para tomada de decisão e determinação de localização foram apontados como relevantes no tocante ao auxílio a tomada de decisão.

Com base nesse resultado, analisamos estudos de casos relacionados aos principais benefícios observados por empresas e centros de pesquisa, tanto em testes laboratoriais quanto em ambiente real, na adoção da tecnologia mencionada.

Assim, propomos o artefato (conforme ilustrado na figura 12 abaixo) como uma prescrição na visão de gestão, visando auxiliar na tomada de decisão para projeto de implantação de ferrovias com tecnologias habilitadoras da indústria 4.0, incluindo sensores inteligentes, monitoramento remoto e métodos multicritério para decisões e localização.

Figura 12: Artefato - Sistema de Sensoriamento (Fase Gestão)



Fonte: Autoria própria (2024).

O artefato 'Sistema de Sensoriamento (Fase de Gestão)' foi desenvolvido contendo três etapas, fornecendo informações essenciais para orientar o gestor no processo de tomada de decisão para projeto de implantação de ferrovias com tecnologia. Em cada etapa, esta pesquisa

recomenda que o gestor (profissional que pode não ser um especialista em tecnologia, mas é conhecedor do setor ferroviário) conte com suporte técnico para ajudá-lo na escolha, por exemplo, do controlador, atuador e sinal de saída do sensor, além de utilizar métodos de localização e multicritérios para garantir a precisão no tratamento das informações recebidas.

Outrossim, o artefato como um dos objetivos do trabalho, foi proposto para colaborar no auxílio a tomada de decisão (fase gestão) no que se refere a projeto de implantação de ferrovias com tecnologia, o que no contexto desta dissertação está relacionada ao estado da Bahia e seus 27 territórios de identidade, conforme visto no capítulo 3. A seguir consta a descrição de cada etapa.

- **Etapa 1 - visão geral**

A 1ª etapa sugere a busca por normas técnicas disponíveis sobre sensores, como por exemplo, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e a ISO (*International Organization for Standardization* - Organização Internacional de Padronização) que possibilitam a padronização para atender as necessidades do negócio.

Por exemplo, a ABNT NBR IEC 60839-11-2 trata de sistemas de segurança eletrônica e alarme, bem como, de sistemas eletrônicos de controle de acesso, com os requisitos do sistema e dos componentes e a ISO/IEC 19637:2016 que trata de tecnologia da informação e estrutura de teste de rede de sensores (ISO/IEC, 2016; ABNT, 2024). Assim, sugere que o gestor utilize das normas técnicas para adequação dos sensores às reais necessidades no que diz respeito aos locais de instalação destes tanto na infraestrutura quanto na superestrutura ferroviária.

Outro componente da 1ª etapa é a rede de comunicação, ao decidir sobre a instalação de sensores em ferrovias, sugere que o gestor certifique de que a região possua rede de comunicação, seja ela 3G, 4G, 5G, ondas de rádio, entre outras, para que os sensores possam comunicar-se com os atuadores e os demais sistemas de comunicação da empresa, gerando informações cruciais para tomada de decisão.

As Regras de Negócios (RDN) é a definição das atividades específicas de um negócio que busca atingir um resultado projetado (DA SILVA JUNIOR, *et al.* 2021). Podem ser definidas ainda como as características que estruturam, processos, softwares, negócios, sensores (DE MELO e SILVA, 2021).

A RDN na 1ª etapa, sugere que o gestor defina a estratégia de controle para os sensores e isso poderá ser realizado com a participação de um especialista da área, pois ao optar por exemplo, por um controlador PID, que é uma técnica de controle de processo que combina três

ações: proporcional (P), integral (I) e derivativa (D), provavelmente ele estará buscando através deste controlador minimizar o erro entre a variável controlada e o valor de referência desejado (DURAES *et al.*, 2021).

Neste caso, sugere que o gestor entenda que o controlador PID vai ajudar a controlar, por exemplo, a frequência de inspeções e a necessidade de retificação de trilhos com base em dados de desgaste em tempo real, outro ponto importante é através do controle dos aparelhos de mudança de via, utilizando sensores de posição para monitorar o deslocamento das agulhas e atuadores para ajustar a velocidade e a força do motor, executando assim com maior precisão o posicionamento das agulhas, redução do desgaste e do risco de falhas e aumento da vida útil dos AMVs (Aparelhos de Mudança de Vias), dentre outras aplicações para este tipo de controle.

Outra estratégia de controle que o gestor pode incluir em sua análise para tomada de decisão é a lógica fuzzy. Essa abordagem, ao analisar os dados dos sensores nos componentes ferroviários, transforma esses dados em indicadores com padrões de tendências que podem sinalizar falhas, permitindo que o gestor estabeleça critérios para intervenções assertivas (JAVANMARD e MISHMAST NEHI, 2019; KUMAR, JHA e SINGH, 2020). Além disso, na perspectiva de controle, a etapa inicial oferece ao gestor a opção de implementar a estratégia de ação de controle liga e desliga (*On-Off*). Por exemplo, ao detectar anomalias nos componentes ferroviários, a utilização da lógica fuzzy possibilitará a ativação ou desativação de sistemas de segurança ou a interrupção imediata do fluxo de energia em determinadas áreas da ferrovia, garantindo uma resposta rápida a situações de risco em tempo real.

O artefato propõe que o gestor escolha as saídas de sinal do sensor, sendo analógica ou digital. Se ele optar pela saída analógica, significa que o sinal pode assumir qualquer valor dentro de determinada faixa e são empregados para monitorar grandezas físicas numa faixa contínua de valores estabelecidos entre limite mínimo e máximo (FELISARDO *et al.* 2023). Por exemplo, em sistemas de monitoramento de infraestrutura ferroviária nos dormentes, trilhos e aparelhos de mudança de via, a saída analógica pode ser utilizada para detectar variações de temperatura, pressão ou vibração, possibilitando a identificação precoce de potenciais problemas e a realização de manutenção preventiva.

Sinal discreto ou digital indica a existência ou não de um evento. Pode assumir os valores (0) ou (1) ou uma combinação destes. Esses sensores apresentam dois estados devido à ocorrência de um evento, isto é, ligado/desligado (presença/ausência) como saída (FELISARDO *et al.* 2023). Por exemplo, detectam a presença de trens em passagens de nível, acionando barreiras e alertas sonoros; indicam o final do curso de pistões pneumáticos ou

hidráulicos em freios e sistemas de mudança de via, dentre outros. Desta forma, na visão de gestão, as regras de negócio definem os critérios que orientam essa escolha, considerando as necessidades estratégicas e operacionais da organização.

Ainda na etapa 1, o artefato sugere que o gestor tenha informações gerenciais através de, por exemplo, do Big Data, este obtendo informações dos sensores no que se refere ao pré-diagnóstico, monitoramento e alertas em tempo real das condições da superestrutura e da infraestrutura ferroviária, bem como, do material rodante, poderá informar o período correto para intervenções, para evitar danos e gerar o acompanhamento contínuo da situação das ferrovias auxiliando na tomada de decisão em diversas frentes, como desvio do trem, tempo de carga e descarga, velocidade, distância percorrida, estado dos trilhos, dormentes, entre outros. Assim, em cada parte da etapa um, o gestor poderá requisitar a participação de especialistas para refinar melhor sua tomada de decisão.

Conexão entre a etapa 1 e 2

A etapa 2 (operação), sugere o artefato que de posse das informações da etapa anterior, o gestor poderá decidir sobre a instalação dos sensores, se na superestrutura, infraestrutura e/ou no material rodante, da mesma forma as RDNs serão necessárias para direcionar as estratégias no que diz respeito aos sensores na superestrutura, infraestrutura e material rodante. Há também uma ligação com as informações gerenciais (utilizando o Big Data), visto que, os dados coletados dos sensores nestes componentes fornecerão subsídios para tomada de decisão e também com o monitoramento da operação e instalação, que, neste sentido, o artefato sugere que a partir da decisão de onde o sensor será instalado (superestrutura, infraestrutura e/ou material rodante) este possa fornecer informações cruciais para as intervenções necessárias nos componentes ferroviários.

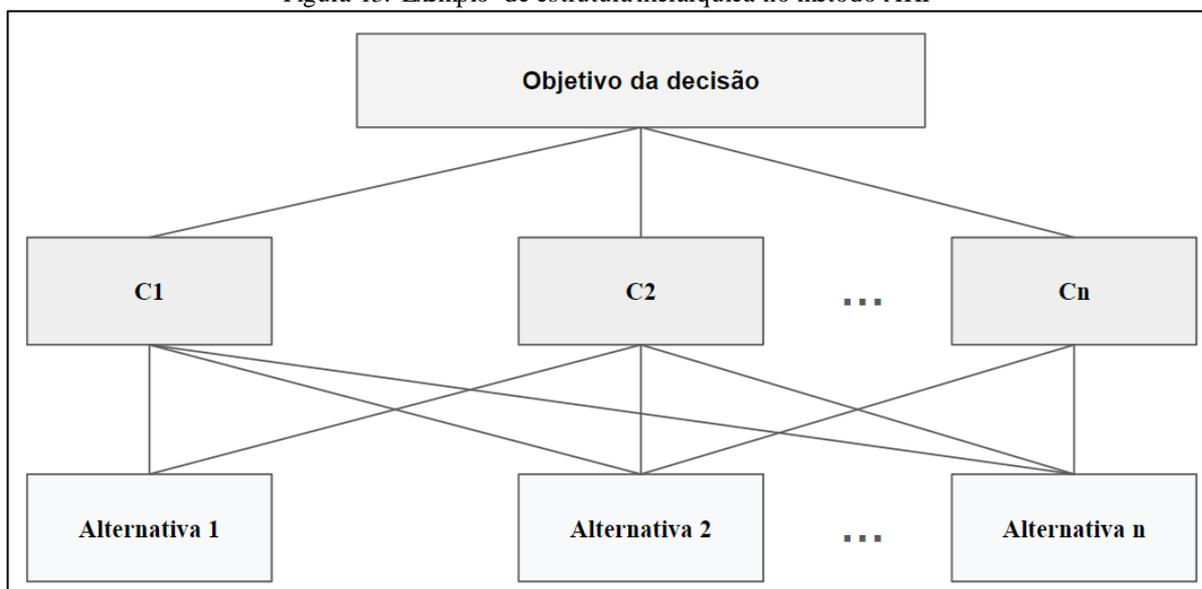
Conexão entre a etapa 1 e 2 e 3

Na etapa 3, o artefato sugere que o gestor possa utilizar métodos de localização (*Facility Location*) para auxiliar na decisão do local para instalação dos sensores ao longo da ferrovia e possibilitando ainda que sua utilização forneça suporte para a decisão de onde instalar ferrovias de acordo com as necessidades de cada região produtiva e de integração com outros modais de transporte. Nesta etapa, sugere ainda que o especialista em método de localização auxilie o gestor na aplicação deste método para a decisão de quais territórios de identidade do estado da Bahia (tratados no capítulo 3) podem ser beneficiados com as ferrovias, considerando as características de cada um, bem como, baseado na etapa 1 no item rede de comunicação, por

exemplo, entender em quais territórios possuem conectividade (seja 3G, 4G, 5G, rádio, etc.) para que o uso de sensores inteligente e monitoramento remoto sejam possíveis.

A etapa 3 apresenta ainda, uma sugestão de método multicritério para auxílio à tomada de decisão. O artefato propõe a utilização do método AHP que traz na estrutura hierárquica (conforme exemplo na figura 13 abaixo) a representação do objetivo, critérios (no artefato, estão sugeridos e representados como C1, C2, C3...) se necessário for subcritérios e alternativas disponíveis contendo as diferentes opções de escolha que se apresentam para alcançar o objetivo, neste sentido, o especialista em métodos multicritérios poderá utilizar além das informações contidas nas etapas do artefato, utilizar as características do estado da Bahia (lôcus da pesquisa), por exemplo, o objetivo poderia ser definir os locais mais adequados para a instalação de sensores nas ferrovias. Os critérios poderiam ser: proximidade com cidades produtivas, proximidade com portos e aeroportos, disponibilidade de rede de comunicação, entre outros. Ao aplicar o método AHP, o especialista e o gestor podem identificar o local que melhor atende a todos os critérios e subcritérios, considerando a importância relativa de cada um deles. Logo após a aplicação do método AHP, o artefato sugere que o gestor verifique se os resultados foram satisfatórios, se sim segue para a etapa de projeto e engenharia (não contempladas neste artefato) e se não, sugere revisar as etapas anteriores e aplicar novamente o método AHP.

Figura 13: Exemplo de estrutura hierárquica no método AHP



Fonte: Autoria própria (2024).

Logo após a definição do objetivo e da estrutura hierárquica, faz-se necessário definir pesos para diferentes classificações e alternativas. Isso envolve uma comparação de pares de

elementos em cada nível da disposição, utilizando uma escala de preferência, geralmente de 1 a 9, para determinar a importância relativa de cada elemento em relação aos outros (CHAVES e REIS, 2022). Neste sentido, sugere a participação de pessoas especializadas no assunto ao qual é o objetivo da aplicação quanto no entendimento do método. Após considerar pesos, é realizada uma análise para determinar a consistência das comparações feitas. Se as comparações não forem consistentes, os ajustes podem ser necessários para garantir a validade do processo de tomada de decisão (SOUZA, OLIVEIRA e SOUZA, 2023). Ademais, abaixo consta um resumo das três etapas sugeridas no artefato:

Fase 1: Visão Geral:

- Enfatiza a importância de seguir as normas técnicas (ABNT, ISO) para seleção e instalação de sensores;
- Reforça a importância de uma rede de comunicação confiável para transmissão de dados dos sensores para atuadores e outros sistemas;
- Destaca o papel das regras de negócio (RDN) na definição de estratégias de controle para sensores, como controle PID e lógica fuzzy;
- Discute a escolha do sinal de saída do sensor (analógico ou digital) com base na aplicação e nos requisitos de dados;
- Destaca os benefícios de utilizar análise de Big Data para obter insights dos dados do sensor para monitoramento em tempo real e tomada de decisão.

Fase 2: Operação:

- Orienta o processo de tomada de decisão para posicionamento do sensor (superestrutura, infraestrutura ou material rodante) com base nas informações coletadas na Fase 1.
- Enfatiza o alinhamento das RDNs com as estratégias de posicionamento de sensores para garantir controle e monitoramento eficazes.
- Sublinha o papel dos dados do sensor no fornecimento de informações para intervenções de manutenção e otimização das operações ferroviárias.

Fase 3: Tomada de Decisão:

- Introduz o conceito de métodos de Localização de Instalações (*Facility Location*) para auxiliar na seleção de locais ideais de instalação de sensores ao longo da rede

ferroviária, bem como a instalação de hubs logísticos e possibilidade de integração com outros modais;

- Propõe o AHP (Processo de Hierarquia Analítica) como uma ferramenta de tomada de decisão multicritério para avaliar e priorizar estratégias alternativas de posicionamento de sensores;
- Recomenda-se revisar as fases anteriores e reaplicar o AHP se os resultados iniciais não forem satisfatórios.

Assim, sugere que o tomador de decisão, a partir do que foi elaborado neste trabalho consiga ter um norte para em conjunto com outras estratégias decidir sobre qual tecnologia é a que mais se adapta a sua realidade (no contexto deste trabalho a escolha da tecnologia se deu a partir da entrevista com especialistas), quais cidades têm maior demanda para escoamento de sua produção, qual melhor local para instalação de terminais ferroviários, hubs logísticos, dentre outros.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho buscou através da revisão da literatura e da utilização do método de pesquisa DSR (*Design Science Research*) caracterizar um artefato com informações relevantes para auxiliar à tomada de decisões no tocante ao uso de tecnologias da indústria 4.0 voltadas a projeto de implementação do modal ferroviário de cargas, para isso, utilizou-se ainda de uma entrevista com 18 especialistas no setor ferroviário onde os resultados contribuíram para o alcance dos objetivos propostos.

A partir do problema norteador desta pesquisa (**Como construir um modelo de apoio à decisão para projetos de implantação do modal ferroviário de cargas nos territórios de identidade do estado da Bahia, baseado nas tecnologias habilitadoras da indústria 4.0?**) foi possível entender que as tecnologias quando analisadas no contexto ferroviário e econômico de um estado (neste caso a Bahia) podem trazer benefícios, como, aumento da quantidade de cargas transportadas, rastreabilidade do trem e das cargas, inspeção remota dos componentes da superestrutura ferroviária e do material rodante, redução de acidentes, integração com outros modais, melhoria na competitividade das regiões produtivas do estado, possibilidade de escolher melhor local para instalação de hubs logísticos para integração e escoamento das cargas, dentre outras.

O objetivo geral do trabalho (**Propor um modelo prescritivo baseado nas tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 aplicáveis a projetos de implantação de transporte ferroviário de carga no estado da Bahia**) foi alcançado à medida que houve o levantamento das principais tecnologias habilitadoras para o segmento ferroviário e aplicáveis aos componentes da superestrutura ferroviária, elencando os benefícios, como, rastreabilidade, manutenção preventiva e remota, compartilhamento de informações da carga e do modal em tempo real entre outros, bem como, a proposição de um artefato contendo três etapas a serem seguidas para auxiliar o gestor na tomada de decisão sobre projeto de implantação de ferrovias com tecnologias habilitadoras da indústria 4.0.

Acredita-se que as informações contidas neste estudo podem servir como base para novas pesquisas e abordagens, aprofundando a compreensão do potencial da Indústria 4.0 para o modal ferroviário de cargas.

Além disso, a metodologia DSR demonstrou ser eficaz ao possibilitar a construção de um artefato alinhado às necessidades específicas do setor ferroviário de cargas, sobretudo no contexto do estado da Bahia. A inclusão de entrevistas com especialistas enriqueceu o estudo, fornecendo “insights” valiosos por profissionais com ampla experiência no setor. Outro ponto

relevante é a flexibilidade e adaptabilidade do artefato proposto, que pode ser ajustado para diferentes cenários e necessidades.

Buscou-se ainda contribuir com informações relevantes sobre a aplicação das tecnologias da indústria 4.0 no modal ferroviário de cargas, especialmente no contexto nacional e local, ancorada na participação de especialistas brasileiros no setor ferroviário.

Outrossim, a pesquisa abre caminho para futuras investigações sobre a aplicação das tecnologias da Indústria 4.0 em outros contextos e modalidades de transporte. O artefato criado nesta dissertação pode servir de modelo para outras regiões e setores, incentivando a busca por tecnologias da indústria 4.0 aplicáveis a infraestrutura de transporte no Brasil.

6.1 Limites e Limitações

Uma das significativas contribuições deste trabalho foi o desenvolvimento de um artefato (Sistema de Sensoriamento - Fase Gestão) destinado a indicar as tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 aplicáveis não só à superestrutura ferroviária, mas à infraestrutura e ao material rodante. Desta forma, este estudo fornece uma base sólida para pesquisas futuras e potenciais experimentos em ambientes reais.

Contudo, o artefato não foi testado em um ambiente real, o que representa uma limitação, pois, a implementação de um artefato desse tipo necessita de tempo e recursos financeiros, incluindo acesso à infraestrutura e superestrutura ferroviária e as tecnologias da Indústria 4.0 em funcionamento, outrossim, a realização de testes práticos em um ambiente ferroviário real é complexa e envolve várias partes interessadas, como governo, empresas do setor, regulamentações e segurança.

Apesar de não testar o artefato criado, utilizou-se de estudos de casos provenientes da literatura, os quais usaram de simulação computacional e aplicações em ambiente real na utilização das tecnologias propostas neste artefato (sensor inteligente e monitoramento remoto, além de método multicritério e de localização) e a partir dos resultados obtidos através da literatura foi possível sugerir a prescrição para auxílio à tomada de decisão para projeto de implantação de ferrovia com tecnologias da indústria 4.0. Ademais, apesar das limitações do estudo, as contribuições para novos trabalhos e aplicações estão sustentadas por todo levantamento da literatura relacionada à temática.

6.1.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Este estudo não buscou exaurir a abordagem da temática, desta forma, sugere outros

estudos, tais como:

- que abordem a viabilidade técnica e financeira na implementação de tecnologias para os componentes ferroviários.
- estudo que aplique os métodos de multicritérios e de localização usando dados levantados neste trabalho para tomada de decisão.
- estudo que crie um sistema computacional contemplando o artefato criado neste trabalho, automatizando a tomada de decisão com os gestores inserindo dados relacionados a tecnologias, componentes da superestrutura ferroviária e os territórios de identidade do estado da Bahia.
- mensurar a viabilidade técnica e financeira deste artefato.
- estudar a possibilidade de nas localidades que já possuam redes metroviárias, conjugar o transporte de cargas nos horários de baixo movimento de pessoas.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.abntcolegao.com.br/>. Acesso em: 05 de fev. 2024.
- AI, B. MOLISCH, A, F. RUPP, M. ZHONG, Z. D. 5G key technologies for smart railways. **Proceedings of the IEEE**, v. 108, n. 6, p. 856-893, 2020. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9103348>. Acesso em: 05 de ago. 2023.
- AGÊNCIA INFRA, 2022. **Trilhos brasileiros começam a receber as locomotivas mais sustentáveis do país**. Disponível em: <https://www.agenciainfra.com/blog/trilhos-brasileiros-comecam-a-receber-as-locomotivas-mais-sustentaveis-do-pais/>. Acesso em: 05 de jan. 2023.
- ANTT. **Agência Nacional de Transportes Terrestre**. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.antf.org.br/releases/o-meio-ambiente-agradece/>. Acesso em: 20 de jan. 2024.
- ANTT. **Agência Nacional de Transportes Terrestre**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/antf/pt-br/assuntos/ferrovias/anuario-do-setor-ferroviario#:~:text=O%20Anu%C3%A1rio%20do%20Setor%20Ferrovi%C3%A1rio,regula%C3%A7%C3%A3o%20e%20fiscaliza%C3%A7%C3%A3o%20da%20ANTT>. Acesso em: 27 de mar. 2023.
- ANTF. **Associação Nacional dos Transportes Ferroviários**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/#:~:text=A%20malha%20ferrovi%C3%A1ria%20norte%20Americana,com%20da%20da%20Sea%20News>. Acesso em: 16 de jan. 2023.
- ANTF. **Associação Nacional dos Transportes Ferroviários**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/#:~:text=A%20malha%20ferrovi%C3%A1ria%20norte%20Americana,com%20da%20da%20Sea%20News>. Acesso em: 16 de jan. 2023.
- ARAÚJO, Beatriz Campos; DOS SANTOS LOPES, Harlenn. Gestão Empresarial: Design Science Research e Business Process Management integradas para uma construtora civil. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 16, p. e517111638586-e517111638586, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/38586/31902>. Acesso em: 02 de set. 2023.
- BUSTOS, Alejandro. RUBIO, Higinio. HERAS, Enrique Soriano. CASTEJON, Cristina. Methodology for the integration of a high-speed train in maintenance 4.0. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 8, n. 6, p. 1605-1621, 2021. Disponível em: <https://academic.oup.com/jcde/article/8/6/1605/6444333>. Acesso em: 01 de ago. 2023.
- BRASIL. **Agência Nacional de Transportes Terrestres**. Manual de Custos Referenciais Ferroviários. 2ª Edição - Brasília, 2021. Disponível em: <https://portal.antf.gov.br/documents/359178/ee36d3a1-d48b-3a5a-0f04-d1ceb846cf01>. Acesso em: 27 de mar. 2023.
- BRASIL. O novo marco regulatório das ferrovias brasileiras. **Ministério dos Transportes**, Brasília, DF, 08 de abr. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt->

- br/assuntos/conjur/o-novo-marco-regulatorio-das-ferrovias-brasileiras. Acesso em: 16 de jan. 2023.
- BRASIL. Conheça destinos imperdíveis para descobrir o turismo ferroviário no Brasil. **Ministério do Turismo**, Brasília, DF, 08 de ago. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/turismo/pt-br/assuntos/noticias/conheca-destinos-imperdiveis-para-descobrir-o-turismo-ferroviario-no-brasil>. Acesso em: 16 de jan. 2023.
- BYSTRZANOWSKA, Marta; TOBISZEWSKI, Marek. How can analysts use multicriteria decision analysis?. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 105, p. 98-105, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165993618301250>. Acesso em: 25 de ago. 2023.
- CAMPOS, Cláudia; BAIARDI, Amílcar. Desenvolvimento Territorial com preceitos de sustentabilidade no trajeto da Ferrovia de Integração Oeste-Leste–FIOL. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 6, p. e31711629054-e31711629054, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/29054/25252>. Acesso em: 27 de mar. 2023.
- CASTIGLIO, Guilherme Santanna. **Determinação de traçados de linhas de transmissão utilizando sistemas de informação geográfica e análise multicritério**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2022. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/248632/001148667.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 29 de ago. 2023.
- CHATTI, Walid. Moving towards environmental sustainability: information and communication technology (ICT), freight transport, and CO2 emissions. **Heliyon**, v. 7, n. 10, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844021022933?via%3Dihub>. Acesso em: 27 de mar. 2023.
- CHAVES, Etiene Cordeiro; REIS, Isabelle Ramos de Souza. **Sistema de apoio a tomada de decisão para investimentos futuros na malha férrea brasileira utilizando o método AHP FUZZY**. 2022. Disponível em: <https://acesse.dev/dGh0A>. Acesso em: 15 de jan. 2024.
- CIA. **The World Factbook. South America Countries**. 2022. Disponível em: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/brazil/>. Acesso em: 18 de jan. 2023.
- CICCARELLI, C.; GIUNTINI, A.; GROOTE, P. **The History of Rail Transport**. In **International Encyclopedia of Transportation**. Elsevier: London, UK, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780081026717104610?via%3Dihub>. 05 de fev. 2023.
- CROZET, Yves. Where high-speed rail is relevant: the French case study. In: **High-Speed Rail and Sustainability**. Routledge, 2017. p. 66-81. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781315709406-13/high-speed-rail-relevant-french-case-study-yves-crozet>. 05 de fev. 2023.

- DANTAS, André Augusto Nóbrega; FRAGA, Yuri Sotero Bomfim. Ferrovias no Brasil: Projetos futuros e em andamento. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 5, p. e25010514917-e25010514917, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/14917>. Acesso em: 16 jan. 2023.
- DA SILVA JUNIOR, Wanderley; MARTINS, Fellipe Silva; GASPAR, Marcos Antonio; MAGALHÃES, Fábio Luís Falchi. Ambiguidade em regras de negócios e resistência: uma revisão da literatura. **Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação**, n. E43, p. 517-532, 2021.
- DA ROCHA KLOECKNER, Natália Varela. Modelo de localização e alocação de produtos de e-commerce: um estudo de caso. **Exacta**, v. 21, n. 2, p. 479-502, 2023. Disponível em: <https://uninove.emnuvens.com.br/exacta/article/view/19244/10237>. Acesso em: 22 de jan. 2024.
- DEVECI, Muhammet; SIMIC, Vladimir; TORKAYESH, Ali Ebadi. Remanufacturing facility location for automotive Lithium-ion batteries: An integrated neutrosophic decision-making model. **Journal of Cleaner Production**, v. 317, p. 128438, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621026500>. Acesso em: 28 de ago. 2023.
- DE BARROS FRANCO, David Gabriel; STEINER, Maria Teresinha Arns; ASSEF, Fernanda Medeiros. Optimization in waste landfilling partitioning in Paraná State, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, p. 125353, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620353993>. Acesso em: 29 de ago. 2023.
- DE CASTRO ALVES, Edgard Gomes; DA SILVA RAMOS, Rebeca Barbosa; SILVA, Carolina Rosa. Transporte ferroviário no Brasil: Desafios e oportunidades. **Revista Conecta**, v. 3, p. 15-27, 2020. Disponível em: <http://www.fatecrl.edu.br/revistaconecta/index.php/rc/article/view/18>. Acesso em: 01 de nov. 2022.
- DE FREITAS, Rodrigo Rodrigues. **METODOLOGIA PARA SISTEMA DE RECONHECIMENTO DE TRANSPORTE DE CARGA SUSTENTÁVEL**. 2022. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: https://www.pet.coppe.ufrj.br/images/documentos/teses/Tese_Rodrigo_Final_1.pdf. Acesso em: 21 de jan. de 2024.
- DE MELO, Adriana Cristina; SILVA, Paulo Sérgio Muniz. Repositório para o rastreamento de requisitos funcionais derivados de regras de negócio. **Revista Brasileira de Computação Aplicada**, v. 6, n. 2, p. 61-75, 2014. Disponível em: <https://seer.upf.br/index.php/rbca/article/view/3787/2941>. Acesso em: 20 de jan. 2024.
- DIAZ-BALTEIRO, Luis; GONZÁLEZ-PACHÓN, Jacinto; ROMERO, Carlos. Measuring systems sustainability with multi-criteria methods: A critical review. **European Journal of Operational Research**, v. 258, n. 2, p. 607-616, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221716307147>. Acesso em: 25 de ago. 2023.

- DOS SANTOS, Debora Brito et al. A infraestrutura no transporte ferroviário no Brasil. **South American Development Society Journal**, v. 4, n. 10, p. 38-51, 2018. Disponível em: <http://www.sadsj.org/index.php/revista/article/view/134>. Acesso em: 31 de out. 2022.
- DU, Cong. DUTTA, Susom. KURUP, Pradeep. YU, Tzuyang. WANG, Xingwei. A review of railway infrastructure monitoring using fiber optic sensors. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 303, p. 111728, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424719309483>. Acesso em: 01 de ago. 2023.
- DURAES, Julia Lambert Andrade; JESUS, Aurea Messias de; GUIMARÃES, Emerson Carlos; FELIX, João Paulo Santos. Revisão Bibliográfica: controladores de processos Literature review: process controllers. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 8, p. 77770-77785, 2021. Disponível em: <https://encurtador.com.br/aegxz>. Acesso em: 20 de jan. 2024.
- DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; JUNIOR, José Antonio Valle Antunes. **Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Bookman Editora, 2020.
- ENSCO, Inc. 2023. **Tecnologias de inspeção**. Disponível em: <https://www.ensco.com/rail/track-geometry-measurement-system-tgms>. Acesso em: 01 de ago. 2023.
- EPL. **Empresa de Planejamento e Logística S.A.** Brasília, 2021. Disponível em: <https://portal.epl.gov.br/relatorio-anual-20211>. Acesso em: 05 de set. 2023.
- FALCIOLA, Justine; JANSEN, Marion; ROLLO, Valentina. Defining firm competitiveness: A multidimensional framework. **World Development**, v. 129, p. 104857, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305750X19305066>. Acesso em: 27 de jul. 2023.
- FERREIRA, Erika Borges; VASCONCELOS, Ana Lúcia Fontes de Souza; SEGURA, Lilia ne Cristina; ABREU, Rute De. ADOÇÃO DA METODOLOGIA DESIGN SCIENCE RESEARCH NAS PESQUISAS DAS MICROS, PEQUENAS E MÉDIAS EMPRESAS. **Redeca, Revista Eletrônica do Departamento de Ciências Contábeis & Departamento de Atuária e Métodos Quantitativos**, v. 9, 2022. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/index.php/redeca/article/view/59002/41049>. Acesso em: 01 de set. 2023.
- FELISARDO, Raul José Alves; SANTOS, Gláucia Nicolau dos; GALRÃO, Diego Gomes. USO DO ARDUINO COMO FERRAMENTA DE PROTOTIPAGEM PARA DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS AUTOMÁTICOS: UMA REVISÃO. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE**, v. 8, n. 1, p. 11-26, 2023. Disponível em: <https://periodicos.grupotiradentes.com/cadernoexatas/article/view/11325/5269>. Acesso em: 22 de jan. 2024.
- FERNANDES, Hellen Maria de Lima Graf; SILVA, Dirceu da; TARIFA, Rosana Ribeiro; GUIRARDELLO, Edinêis de Brito. Construção e validação de instrumento para avaliação do Lean Healthcare em instituições de saúde. **Revista Gaúcha de Enfermagem**, v. 45, p. e20230061, 2024. Disponível em:

- <https://www.scielo.br/j/rgenf/a/J9hYQwvHRWrSQnbPsPbsSsg/?lang=pt#>. Acesso em: 25 de jan. de 2024.
- FIEB. **Federação das Indústrias do Estado da Bahia**. Guia da Indústria 2020. Disponível em: <https://www.fieb.org.br/guia-industrial/consulta-basica/>. Acesso em: 20 de jul. 2023.
- FORD, Robert; KWUN, David J.; VAN FLEET, David. Fred Harvey and the Santa Fe Railroad's Brand extension strategy to develop Southwestern tourism in the USA in the early 1900s. **Tourism and Hospitality Research**, p. 14673584231167763, 2023. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/14673584231167763>. Acesso em: 05 de maio. 2023.
- GAO, X.; FENG, Q.; WANG, A.; SHENG, X.; CHENG, G. Testing research on frequency-dependent characteristics of dynamic stiffness and damping for high-speed railway fastener. **Engineering Failure Analysis**, v. 129, p. 105689, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630721005501>. Acesso em: 03 de ago. 2023.
- GAO, Meilin; AI, Bo; NIU, Yong; WU, Wen; YANG, Peng; LYU, Feng; SHEN, Xuemin. On hybrid beamforming of mmWave MU-MIMO system for high-speed railways. In: **ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)**. IEEE, 2019. p. 1-6. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8762074>. Acesso em: 05 de ago. 2023.
- GARCIA, Reinaldo Crispiniano; ORTIZ, Daniela Rodríguez. Modelo de otimização na operação carro-pipa na distribuição de água do nordeste brasileiro com a construção de novas estações de água: estudo de caso em Alagoas. In: **IN: 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**. 2020. p. 1-11. Disponível em: https://www.anpet.org.br/anais34/documentos/2020/Log%C3%ADstica/Log%C3%ADstica/2_150_AC.pdf. Acesso em: 22 de jan. 2024.
- GASPAR, I. de A.; SHIMOYA, Aldo. Avaliação da confiabilidade de uma pesquisa utilizando o coeficiente Alfa de Cronbach. **SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DA UFG**, v. 7, 2017.
- GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2019.
- GUO, H.-M.; WANG, Q.; WANG, W.-J.; GUO, J.; LIU, Q.-Y.; ZHU, M.-H. Investigation on wear and damage performance of laser cladding Co-based alloy on single wheel or rail material. **Wear** 2015, 328–329, 329–337. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004316481500174X>. Acesso em: 02 de ago. 2023.
- GRUETZMACHER, Sarah B.; VAZ, Clara B.; FERREIRA, Ângela P. Sustainability performance assessment of the transport sector in European countries. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia**, n. 104, p. 42-52, 2022. Disponível em: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302022000300042&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 07 de mar. 2023.
- GLOBAL FIREPOWER. **Total Railway Coverage by Country (2023)**. Disponível em: <https://www.globalfirepower.com/railway-coverage.php>. Acesso em: 15 de fev. 2023.

- HANSEL, Tiago Fernando; BERTOLINI, Geysler Rogis Flor; RIBEIRO, Ivano. Diversificação ou especialização: uma revisão sistemática à luz da Teoria do Comportamento Planejado. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, p. e15211124934-e15211124934, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/24934/21784>. Acesso em: 04 de ago. 2023.
- HEVNER, A. R.; MARCH, S.T.; PARK, J. Design Science in Information Systems Research. **MIS Quarterly**, v. 28, n. 1, p. 75-105, 2004. Disponível em: <https://aisel.aisnet.org/misq/vol28/iss1/6/>. Acesso em: 15 de maio. 2023.
- HÖRSTING, Lena; CLEOPHAS, Catherine. Scheduling shared passenger and freight transport on a fixed infrastructure. **European Journal of Operational Research**, v. 306, n. 3, p. 1158-1169, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221722006130?via%3Dihub>. Acesso em: 31 de maio. 2023.
- HIASSAT, Abdelhalim; DIABAT, Ali; RAHWAN, Iyad. A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products. **Journal of manufacturing systems**, v. 42, p. 93-103, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612516300693?via%3Dihub>. Acesso em: 29 de ago. 2023.
- IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/territorio/20591-introducao.html#:~:text=O%20Brasil%20%C3%A9%20um%20dos,e%20China%20em%20extens%C3%A3o%20territorial>. Acesso em: 05 de jan. 2023.
- IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ba.html>. Acesso em: 05 de jan. 2023.
- INVESTE BAHIA. **Distritos industriais**. <http://www.investebahia.com/investidor/guia-industrial/>. Acesso em: 20 de jul. 2023.
- IPHAN. **História das Ferrovias no Brasil**. Brasília, 2022. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/609#:~:text=A%20hist%C3%B3ria%20das%20ferrovias%20no,com%2014%20km%20de%20extens%C3%A3o>. Acesso em: 18 de jan. 2023.
- ISO/IEC 19637:2016. **International Organization for Standardization/ International Electrotechnical Commission**. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/65576.html>. Acesso em: 06 de fev. 2024.
- ISLER, Cassiano A.; ASAFF, Yesid; MARINOV, Marin. Designing a geo-strategic railway freight network in Brazil using GIS. **Sustainability**, v. 13, n. 1, p. 85, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/1/85>. Acesso em: 05 de jan. 2024.
- JAVANMARD, Moslem; MISHMAST NEHI, Hassan. A solving method for fuzzy linear programming problem with interval type-2 fuzzy numbers. **International Journal of Fuzzy Systems**, v. 21, p. 882-891, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40815-018-0591-3>. Acesso em: 28 de ago. 2023.

- JING, G. SIAHKOUHI, M. EDWARDS, J. R. DERSCH, M. S. HOULT, N. A.I. Smart railway sleepers-a review of recent developments, challenges, and future prospects. **Construction and Building Materials**, v. 271, p. 121533, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820335376>. Acesso em: 02 de ago. 2023.
- KARL, Alexandre Augusto. **Análise das práticas sociais da economia circular e suas contribuições para os objetivos de desenvolvimento sustentável**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/241101>. Acesso em: 25 de ago. 2023.
- KUMAR, Ranjan; JHA, Sripati; SINGH, Ramayan. A different approach for solving the shortest path problem under mixed fuzzy environment. **International journal of fuzzy system applications (IJFSA)**, v. 9, n. 2, p. 132-161, 2020. Disponível em: <https://www.igi-global.com/article/a-different-approach-for-solving-the-shortest-path-problem-under-mixed-fuzzy-environment/250823>. Acesso em: 28 de ago. 2023.
- LACERDA, Daniel Pacheco et al. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & produção**, v. 20, p. 741-761, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gp/a/3CZmL4JxLmxCv6b3pnQ8pq/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 01 de set. 2023.
- LAITON-BONADIEZ C, BRANCH-BEDOYA JW, ZAPATA-CORTES J, PAIPA-SANABRIA E, ARANGO-SERNA M. Industry 4.0 Technologies Applied to the Rail Transportation Industry: A Systematic Review. **Sensors**. 2022; 22(7):2491. <https://doi.org/10.3390/s22072491>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/7/2491>. Acesso em: 15 de mar. 2023.
- LANEMAX. **Tipos de vagões ferroviários**, 2019. Disponível em: <http://lanemax.top/info/rail-waggons.html>. Acesso em: 05 de mar. 2023.
- LEBOEUF, Michel. High-speed rail: Opportunities and threats. **Engineering**, v. 2, n. 4, p. 402-408, 2016. Disponível em: <https://encurtador.com.br/awDGV>. Acesso em: 08 de mar. 2023.
- LEDERMAN, George. CHEN, Siheng. GARRETT, James H. KOVAČEVIĆ, Jelena. NOH, Hae Young. BIELAK, Jacobo. A data fusion approach for track monitoring from multiple in-service trains. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 95, p. 363-379, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327017301516?via%3Dihub>. Acesso em: 01 de ago. 2023.
- LIU, S.; HUANG, H.; QIU, T. Laboratory development and testing of “SMARTROCK” for railroad ballast using discrete element modeling. In: **ASME/IEEE Joint Rail Conference**. American Society of Mechanical Engineers, 2015. p. V001T01A019. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/JRC/proceedings-abstract/JRC2015/56451/267711>. Acesso em: 02 de ago. 2023.
- LIU, S.; QIU, T.; QIAN, Y.; HUANG, H.; TUTUMLUER, E.; SHEN, S. Simulations of large-scale triaxial shear tests on ballast aggregates using sensing mechanism and real-time (SMART) computing. **Computers and Geotechnics**, v. 110, p. 184-198, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103178>. Acesso em: 02 de ago. 2023.

- em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266352X19300436>. Acesso em: 03 de ago. 2023.
- LYRA, Alex Sander. **Modelagem matemática para otimização da coleta e distribuição de dejetos em biodigestor central**. 2021. Dissertação (Mestrado em agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, São Paulo, 2021. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/215246/lyra_as_me_botfca.pdf?sequence=13&isAllowed=y. Acesso em: 26 de ago. 2023.
- MATOS, Daniela Biccas Ferraz; THOMÉ, Antonio Márcio Tavares. Problemas de Cobertura em Localização de Instalações: Uma Revisão Sistemática da Literatura. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, 19., 2019, Rio de Janeiro, RJ. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Centro de Análises de Sistemas Navais, 2019. Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br/s3-sa-east-1.amazonaws.com/marineengineeringproceedings/spolm2019/154.pdf>. Acesso em: 29 de ago. 2023.
- MELO FILHO, Marconi Arani. Novo marco regulatório do setor ferroviário (a Lei das Ferrovias): uma análise crítica à luz das teorias regulatórias apoiadas na responsividade. **Journal of Law and Regulation**, v. 8, n. 2, p. 146-171, 2022.
- MINEIRO, Márcia. Pesquisa de survey e amostragem: aportes teóricos elementares. **Revista de Estudos em Educação e Diversidade-REED**, v. 1, n. 2, p. 284-306, 2020. Disponível em: <https://periodicos2.uesb.br/index.php/reed/article/view/7677/5424>. Acesso em: 05 de jan. 2024.
- MIRANDA, Rafael Virgílio; FERREIRA, Alex Franco. MONITORAMENTO DE APARELHOS DE MUDANÇA DE VIA TALONÁVEIS EM ÁREAS DE MANOBRAS NO SETOR FERROVIÁRIO VIA REDE LORA/LORAWAN. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 9, n. 3, p. 1322-1334, 2023.
- NERY, Vilson Pedro. APLICAÇÃO DO MÉTODO MULTICRITÉRIO DE TOMADA DE DECISÃO NA MODELAGEM JURÍDICA DE REGULAÇÃO DE UMA CONCESSÃO DE FERROVIA UTILIZANDO O SOFTWARE SUPER DECISIONS. **Revista Reflexão e Crítica do Direito**, v. 10, n. 2, p. 316-340, 2022. Disponível em: <https://revistas.unaerp.br/rcd/article/view/3026/2166>. Acesso em: 28 de ago. 2023.
- O'CONNOR, Neale G.; YANG, Zhilin; JIANG, Ling. Challenges in gaining supply chain competitiveness: Supplier response strategies and determinants. **Industrial Marketing Management**, v. 72, p. 138-151, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001985011730576X>. Acesso em: 28 de jul. 2023.
- PAMUCAR, Dragan; DEVECI, Muhammet; CANITEZ, Fatih; PAKSOY, Turan; LUKOVAC, Vesko. A novel methodology for prioritizing zero-carbon measures for sustainable transport. **Sustainable production and consumption**, v. 27, p. 1093-1112, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550921000543>. Acesso em: 25 de ago. 2023.
- PAKSOY, Turan; GUNDUZ, Mehmet Akif; DEMIR, Sercan. Overall Competitiveness Efficiency: A Quantitative Approach to the Five Forces Model. **Available at SSRN**

- 4374824, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835223004461?via%3Dihub>. Acesso em: 27 de jul. 2023.
- PACCHINI, Athos Paulo Tadeu; LUCATO Wagner Cezar; FACCHINI Francesco; MUMMOLO Giovanni. The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0. **Computers in Industry**, v. 113, p. 103125, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361519303835>. Acesso em: 10 de mar. 2023.
- PÉRA, T.G.; CAIXETA-FILHO, J.V. O perfil das ferrovias do agronegócio brasileiro. Série Logística do Agronegócio – Oportunidades e Desafios, V.6, 2021, 82 p. **Grupo ESALQ-LOG/USP**, Piracicaba, Brasil. Disponível em: <https://esalqlog.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/O%20Perfil%20das%20Ferrovias%20do%20Agroneg%C3%B3cio%20Brasileiro.pdf>. Acesso em: 16 de fev. 2023.
- PIMENTA, Lianne Borja; BELTRÃO, Norma Ely Santos; GEMAQUE, Amanda Madalena da Silva; TAVARES, Paulo Amador. Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. **Interações (Campo Grande)**, v. 20, p. 407-420, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/inter/a/czmJyn93szNcX5jfxjPR8M/?lang=pt>. Acesso em: 25 de ago. 2023.
- PINEDA-JARAMILLO, Juan; VITI, Francesco. MLOps in freight rail operations. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 123, p. 106222, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197623004062?via%3Dihub>. Acesso em: 15 de mar. 2023.
- PORTER, Michael E. Heppelmann J.E. How smart, connected products are transforming competition. **Harvard business review**, v. 92, n. 11, p. 64-88, 2014. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5544175>. Acesso em: 28 de jul. 2023.
- PRATICÒ, Filippo Giammaria; FEDELE, Rosario. Economic Sustainability of High-Speed and High-Capacity Railways. **Sustainability**, v. 15, n. 1, p. 725, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/1/725>. Acesso em: 26 de jul. 2023.
- PRODANOV, C.C.; FREITAS, E.C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2 ed. Rio Grande do Sul, 2013.
- PNL. **Plano Nacional de Logística**. Brasília, 2018. Disponível em: <https://www.ppi.gov.br/wp-content/uploads/2023/01/plano-nacional-de-logisticapnl.pdf>. Acesso em: 05 de set. 2023.
- RAMOS, Simone Cristina; FERNANDES, Jane Mendes Ferreira. **Processo Decisório e Organizações**. Editora Appris, 2023.
- RELATÓRIO DO MERCADO GLOBAL DE TRANSPORTE FERROVIÁRIO 2023. **The Business Research Company**, 2023. Disponível em: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/rail-transport-global-market-report>. Acesso em: 20 de mar. 2023.

- RIBEIRO, Rômulo Luiz Pereira. **Análise automática de normas aplicada em projeto geométrico de superestrutura ferroviária**. 2018. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-B9EFJL/1/dissertacao___versao_final.pdf. Acesso em: 20 de mar. 2023.
- RIEG, Denise Luciana; SCRAMIM, Fernando Cezar Leandro; VALENTINE, Bruno Argona; DA MATA, Bruno Freitas; PEXIOLINI, Gustavo Costa. Avaliação da Qualidade em Serviços de Transporte Metropolitano através da Adaptação do Instrumento SERVPERF. **Revista ESPACIOS**| Vol. 36 (Nº 10) Año 2015, 2015. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a15v36n10/15361003.html>. Acesso em: 20 de jan. 2024.
- ROMAN, Darlan José; OSINSKI, Marilei; SELIG, Paulo Mauricio. Análise do processo decisório nas organizações de gestão social: estudo de caso da organização WSH. **GESTÃO E DESENVOLVIMENTO**, v. 13, n. 1, p. 130-143, 2016. Disponível em: <https://periodicos.feevale.br/seer/index.php/revistagestaoedesenvolvimento/article/view/277/389>. Acesso em: 03 de ago. de 2023.
- ROVERI, Nicola; CARCATERRA, Antonio; SESTIERI, Aldo. Real-time monitoring of railway infrastructures using fibre Bragg grating sensors. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 60, p. 14-28, 2015. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84925936555&origin=inward&txGid=4a4d052ee0c216232cf6beb202dda64b>. Acesso em: 08 de mar. 2024.
- RUMO LOGÍSTICA. **Rumo investe em Inteligência Artificial para aprimorar projeto de detecção de trilhos quebrados e reduzir risco de acidentes**. São Paulo: Rumo Logística, 2023. Disponível em: <https://rumolog.com/sala-de-imprensa/rumo-investe-e-m-inteligencia-artificial-para-aprimorar-projeto-de-deteccao-de-trilhos-quebrados-e-reduzir-risco-de-acidentes/>. Acesso em: 10 de jan. 2024.
- SANTOS, BP, ALBERTO, A., LIMA, TDFM, & Charrua-Santos, FMB. Indústria 4.0: desafios e oportunidades. **Revista Produção e Desenvolvimento**, v. 4, n. 1, p. 111-124, 2018. Disponível em: <https://revistas.cefet-rj.br/index.php/producaoedesenvolvimento/article/view/e316/193>. Acesso em: 25 de mar. 2023.
- SEI. **Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia**. Fonte de dados. Disponível em: https://www.sei.ba.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=189&Itemid=56. Acesso em: 03 de mar. 2023.
- SECULTBA. **Secretaria de Cultura do Estado da Bahia**. Território de identidade. Disponível em: <http://www.cultura.ba.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=314>. Acesso em: 03 de mar. 2023.
- SEDGWICK, John (2021) How the Santa Fe Railroad changed America Forever. *Smithsonian Magazine*. Disponível em: <https://www.smithsonianmag.com/history/santa-fe-railroad-changed-america-forever-180977952/>. Acesso em: 05 de maio. 2023.

- SEEG. **Sistema de Estimativa de Gases**. Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2020. Disponível em: <https://seeg.eco.br/2023/03/21/seeg-9-1990-2020/>. Acesso em: 25 de mar. 2023.
- SEMA. **Secretaria do Meio Ambiente**. Informações costeiras. Disponível em: <http://www.meioambiente.ba.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=198>. Acesso em: 27 de dez. 2022.
- SOUZA, Donizeti Leandro De; SOUZA, Thais Assis De; ZAMBALDE, Andre Luiz. Pesquisa acadêmica e avanços em Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I): uma proposta de aproximação pela Design Science. **Cadernos EBAPE. BR**, v. 18, p. 459-472, 2020. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/3232/323264934003/html/>. Acesso em: 01 de set. 2023.
- SOUZA, Matheus Melo de; OLIVEIRA, Andréa Leda Ramos de; SOUZA, Marlon Fernandes de. Location of agricultural warehouses based on spatial multicriteria analysis. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 62, p. e268622, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/whY6xdCFGX9jHX3S5PBTNgz/?lang=pt>. Acesso em: 06 de jan. 2024.
- SINCHOLDRAIL. **A Importância Da Haste De Calibre Ferroviário Na Fixação Ferroviária**, 2023. Disponível em: <http://pt.sincholdrail.org/info/the-importance-of-rail-gauge-rod-in-railway-fa-19374781.html>. Acesso em: 12 de jul. 2023.
- SINCHOLDRAIL. **Quais São Os Componentes Do Sistema De Fixação De Trilho?** Disponível em: <http://pt.sincholdrail.org/news/what-are-the-components-of-rail-fastening-syst-6020180.html>. Acesso em: 03 de jun. 2023.
- SOARES, Isabela Rubim Costa; BIAGIO, Marina Gutierrez; GONÇALVES, Max Filipe Silva; JUNIOR, Marcos Wagner Jesus Servare. Localização de centro de triagem de papel para escolas do bairro da Vila Mariana, São Paulo. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 6, n. 7, p. 110-119, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/33014/22209>. Acesso em: 26 de ago. 2023.
- STOILOVA, Svetla. An Integrated Approach of Strategic Planning and Multi-Criteria Analysis to Evaluate Transport Strategies in Railway Network. In: **Railway Transport Planning and Management**. IntechOpen, 2021. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/78422>. Acesso em: 06 de ago. 2023.
- QIAN, Y.; DERSCH, MS; GAO, Z.; EDWARDS, JR. Railroad infrastructure 4.0: Development and application of an automatic ballast support condition assessment system. **Transportation Geotechnics**, v. 19, p. 19-34, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214391218301570>. Acesso em: 26 de jul. 2023.
- TAHERDOOST, Hamed; MADANCHIAN, Mitra. Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts. **Encyclopedia**, v. 3, n. 1, p. 77-87, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-8392/3/1/6>. Acesso em: 25 de ago. 2023.
- TAHERI, Shima; TAMANNAEI, Mohammad. Integrated Multi-Level Intermodal Network Design Problem: A Sustainable Approach, Based on Competition of Rail and

- Road Transportation Systems. **Networks and Spatial Economics**, v. 23, n. 1, p. 1-37, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11067-022-09577-6>. Acesso em: 01 de ago. 2023.
- TIAN, Guangdong., LU, Weidong., ZHANG, Xuesong., ZHAN, Meng., DULEBENETS, Maxim A., ALEKSANDROV, Anatoly., FATHOLLAHI-FARD, A M., IVANOV, Mikhail. A survey of multi-criteria decision-making techniques for green logistics and low-carbon transportation systems. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 20, p. 57279-57301, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-023-26577-2>. Acesso em: 25 de ago. 2023.
- TISCHER, Vinicius. Panorama do transporte ferroviário urbano no Brasil e no mundo. **Revista Internacional de Ciências**, v. 8, n. 1, p. 62-81, 2018. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/ric/article/view/31636/24890>. Acesso em: 05 de maio. 2023.
- TOTH, A, D. PADAYACHEE, J. MAHLATJI, T. VILAKAZI, S.. Report on case studies of additive manufacturing in the South African railway industry. **Scientific African**, v. 16, p. e01219, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468227622001260>. Acesso em: 03 de ago. 2023.
- TOTH, A. D.; VILAKAZI, S. Benefits of reinforced meshing and materials testing of 3D printed parts to assist mechanical design in the railway infrastructure environment. In: **RAPDASA 2019 Conference Proceeding**. 2019. Disponível em: <https://site.rapdasa.org/wp-content/uploads/2020/04/396-Toth.pdf>. Acesso em: 03 de ago. 2023.
- TOTAL RAILWAY COVERAGE BY COUNTRY (2023). **Global Firepower**, 2023. Disponível em: <https://www.globalfirepower.com/railway-coverage.php>. Acesso em: 05 de maio. 2023.
- TORO, R., Peña-Sarmiento, M., Avendaño-Prieto, B. L., Mejía-Vélez, S., & Bernal-Torres, A. Análisis empírico del Coeficiente Alfa de Cronbach según opciones de respuesta, muestra y observaciones atípicas. **Revista Iberoamericana de Diagnóstico y Evaluación-e Avaliação Psicológica**, v. 2, n. 63, p. 17, 2022.
- WANG, Longqi; ZHANG, Yao; LIE, Seng Tjhen. Detection of damaged supports under railway track based on frequency shift. **Journal of Sound and Vibration**, v. 392, p. 142-153, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X16306423>. Acesso em: 01 de ago. 2023.
- XU, Jinlong; BUTLER, Liam J.; ELSHAFIE, Mohammed ZEB. Experimental and numerical investigation of the performance of self-sensing concrete sleepers. **Structural health monitoring**, v. 19, n. 1, p. 66-85, 2020. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1475921719834506>. Acesso em: 02 de ago. 2023.
- ZENG, K.; QIU, T.; BIAN, X.; XIAO, M.; HUANG, H. Identification of ballast condition using SmartRock and pattern recognition. **Construction and Building Materials**, v. 221, p. 50-

59, 2019. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819314643>. Acesso em: 03 de ago. 2023.

ZHOU, T. LI, H. WANG, Y. LIU, L. TAO, Cl. Channel modeling for future high-speed railway communication systems: A survey. **IEEE access**, v. 7, p. 52818-52826, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8695051>. Acesso em: 05 de ago. 2023.

APÊNDICE A - Termo de consentimento livre e esclarecido para a realização da entrevista com os especialistas

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Você está sendo convidado(a) como voluntário(a) a participar da pesquisa “**TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 NO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGAS: PROPOSIÇÃO DE UM MODELO PARA AUXÍLIO À TOMADA DE DECISÃO NOS TERRITÓRIOS DE IDENTIDADE DO ESTADO DA BAHIA**”, conduzida pelo pesquisador/mestrando Daniel Rodrigues dos Santos, sob a orientação do Professor Dr. Aloísio Santos Nascimento Filho.

Nesta pesquisa, o objetivo geral do presente estudo é propor um modelo prescritivo para auxílio à tomada de decisão, baseado nas tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 aplicáveis ao transporte ferroviário de carga no estado da Bahia.

Sua participação nesta pesquisa consistirá na cooperação em entrevista, a ser realizada pelo pesquisador Daniel Rodrigues dos Santos, a respeito do tema da dissertação. As informações obtidas serão utilizadas exclusivamente para os fins acadêmicos e científicos, servindo como embasamento para a elaboração da dissertação e de possíveis artigos técnicos e outras produções intelectuais geradas pelo referido pesquisador no Programa de Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial do Centro Universitário SENAI CIMATEC.

A participação neste estudo não acarreta custos, nem implica no recebimento de qualquer vantagem financeira. Você terá informações e esclarecimentos sobre o estudo em qualquer aspecto que se desejar, e estará livre para participar ou recusar-se a participar. Poderá, também, retirar seu consentimento, ou interromper a participação, a qualquer momento. A sua participação é voluntária, e a recusa em participar não acarretará qualquer prejuízo.

Caso haja necessidade de qualquer esclarecimento adicional, ou ainda deseje se retirar da pesquisa a qualquer tempo, basta informar aos pesquisadores abaixo:

Pesquisador: Daniel Rodrigues dos Santos (daniel.santos@fieb.org.br). Endereço: Av. Orlando Gomes, 1845 - Piatã, Salvador - BA, telefone: (71) 3534-8090.

Professor Orientador: Dr. Aloísio Santos Nascimento Filho (aloisio.filho@fieb.org.br). Com endereço profissional: Av. Orlando Gomes, 1845 - Piatã, Salvador - BA, telefone: (71) 3534-8090. Os resultados da pesquisa estarão à sua disposição, quando finalizada. Seu nome ou o material que indique sua participação não será divulgado ou liberado.

Caso você concorde em participar desta pesquisa, assine ao final deste documento, que possui duas vias, sendo uma delas sua, e a outra do Pesquisador. Sua identidade será tratada de acordo com os padrões profissionais de sigilo, atendendo às disposições da legislação brasileira, em especial a Resolução N° 466/12 do Conselho Nacional de Saúde, utilizando-se as informações

somente para os fins acadêmicos e científicos aqui especificados. Declaro que entendi os objetivos, riscos e benefícios de minha participação na pesquisa, e que concordo em participar.

_____, ____ de _____ de 2024.

Assinatura do Pesquisador (a): _____

Assinatura do (a) Participante: _____

APÊNDICE B - Entrevista realizada com especialistas no setor ferroviário.

Entrevista - Tecnologias da indústria 4.0 e o setor ferroviário de cargas no estado da Bahia.

Bem-vindo (a) a pesquisa que faz parte da dissertação (mestrado) que estuda tecnologias da indústria 4.0 aplicáveis aos componentes da superestrutura ferroviária, sobretudo, visa entender impactos e benefícios para o setor no estado da Bahia, buscando a partir disso, uma prescrição para auxílio à tomada de decisão. Ao responder, você estará desempenhando um papel fundamental na contribuição para a disseminação de conhecimento relevante e no avanço das práticas inovadoras dentro da indústria ferroviária. Agradeço antecipadamente pela sua colaboração.

Tempo de sua experiência e/ou envolvimento no setor ferroviário:

Até 2 anos Entre 2 e 4 anos Entre 4 e 6 anos Entre 6 e 8 anos Acima de 8 anos.

Tipo de instituição que você atua:

ICT - Instituto de Ciência e Tecnologia Universidade/faculdade Consultoria e outros
 Empresa privada Empresa pública.

As perguntas de 1 a 5 estão relacionadas a indústria 4.0 e as tecnologias:

Big Data - envolve a captura, armazenamento, processamento e análise de grandes volumes de informações.

Realidade Aumentada (refere-se à sobreposição de elementos digitais, como gráficos, sons e outros dados, no ambiente real) e **Virtual** (criação de um ambiente totalmente virtual, no qual o usuário pode interagir e imergir completamente).

Inteligência Artificial - capacidade de máquinas e sistemas de software executarem tarefas que normalmente exigiriam inteligência humana.

Sensores Inteligentes (envolve a utilização de sensores avançados que podem coletar dados em tempo real de diferentes ambientes e dispositivos) e **Monitoramento Remoto** (acompanhamento em tempo real de processos, ambientes ou dispositivos, facilitando a detecção precoce de problemas, manutenção preditiva e aprimoramento da eficiência operacional).

1) Quão familiarizado você está com as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0: sendo (1) sem conhecimento, (2) conhecimento básico, (3) conhecimento intermediário, (4) conhecimento avançado ou (5) especialista.

sem conhecimento conhecimento básico conhecimento intermediário conhecimento avançado especialista.

2) Como você avaliaria a importância da tecnologia **Big Data** para aprimorar a eficiência e a manutenção dos seguintes componentes ferroviários: dormentes, trilhos, lastros, aparelhos de mudança de vias e itens de fixação? Sendo (1) pouco importante, (2) moderadamente importante, (3) importante, (4) muito importante ou (5) extremamente importante.

pouco importante moderadamente importante importante muito importante extremamente importante.

3) Em sua opinião, qual importância das tecnologias **Realidade Aumentada e Virtual** para aprimorar a eficiência e a manutenção dos seguintes componentes ferroviários: dormentes, trilhos, lastros, aparelhos de mudança de vias e itens de fixação. Sendo (1) pouco importante, (2) moderadamente importante, (3) importante, (4) muito importante ou (5) extremamente importante.

pouco importante moderadamente importante importante muito importante extremamente importante.

4) Em sua opinião, qual importância da tecnologia **Inteligência Artificial** para aprimorar a eficiência e a manutenção dos seguintes componentes ferroviários: dormentes, trilhos, lastros, aparelhos de mudança de vias e itens de fixação. Sendo (1) pouco importante, (2) moderadamente importante, (3) importante, (4) muito importante ou (5) extremamente importante.

pouco importante moderadamente importante importante muito importante extremamente importante.

5) Em sua opinião, qual importância das tecnologias **Sensores inteligentes e Monitoramento Remoto** para aprimorar a eficiência e a manutenção dos seguintes componentes ferroviários: dormentes, trilhos, lastros, aparelhos de mudança de vias e itens de fixação. Sendo (1) pouco importante, (2) moderadamente importante, (3) importante, (4) muito importante ou (5) extremamente importante.

pouco importante moderadamente importante importante muito importante extremamente importante.

As perguntas de 6 a 9 estão relacionadas aos principais desafios que podem ser enfrentados no setor ferroviário na implementação de tecnologias.

6) Avalie o grau de importância do desafio "falta de conhecimento técnico" que o setor ferroviário poderá enfrentar na implementação de novas tecnologias. Sendo (1) pouco importante, (2) moderadamente importante, (3) importante, (4) muito importante ou (5) extremamente importante.

pouco importante moderadamente importante importante muito importante extremamente importante.

7) Avalie o grau de importância do desafio "**investimento inicial elevado**" que o setor ferroviário poderá enfrentar na implementação de novas tecnologias. Sendo (1) pouco importante, (2) moderadamente importante, (3) importante, (4) muito importante ou (5) extremamente importante.

pouco importante moderadamente importante importante muito importante extremamente importante.

8) Avalie o grau de importância do desafio "**resistência à mudança**" que o setor ferroviário poderá enfrentar na implementação de novas tecnologias. Sendo (1) pouco importante, (2) moderadamente importante, (3) importante, (4) muito importante ou (5) extremamente importante.

pouco importante moderadamente importante importante muito importante extremamente importante.

9) Avalie o grau de importância do desafio "**segurança cibernética**" que o setor ferroviário poderá enfrentar na implementação de novas tecnologias. Sendo (1) pouco importante, (2) moderadamente importante, (3) importante, (4) muito importante ou (5) extremamente importante.

pouco importante moderadamente importante importante muito importante extremamente importante.

As perguntas de 10 a 17 estão relacionadas ao estado da Bahia, transporte ferroviário e o auxílio à tomada de decisão.

10) Qual seu conhecimento sobre o estado da Bahia no que se refere a vocação econômica em seus municípios? Sendo (1) sem conhecimento, (2) conhecimento básico, (3) conhecimento intermediário, (4) avançado ou (5) especialista.

sem conhecimento conhecimento básico conhecimento intermediário avançado especialista.

11) O estado da Bahia é o único na federação com maior quantidade de fronteiras (oito), desta forma, **como você avalia a importância das ferrovias no escoamento da produção no estado?** Sendo (1) pouco importante, (2) moderadamente importante, (3) importante, (4) muito importante ou (5) extremamente importante.

pouco importante moderadamente importante importante muito importante extremamente importante.

12) Avalie a relevância da seguinte consideração na tomada de decisão para instalação de ferrovias e hubs logísticos para integração entre modais: **possibilidade de integrar as empresas locais à ferrovia para escoamento de sua produção.** Sendo (1) pouco relevante, (2) moderadamente relevante, (3) relevante, (4) muito relevante ou (5) extremamente relevante.

pouco importante moderadamente importante importante muito importante extremamente importante.

13) Avalie a relevância da seguinte consideração na tomada de decisão para instalação de ferrovias e hubs logísticos para integração entre modais: **uso de métodos científicos para auxílio à tomada de decisão.** Sendo (1) pouco relevante, (2) moderadamente relevante, (3) relevante, (4) muito relevante ou (5) extremamente relevante.

pouco importante moderadamente importante importante muito importante extremamente importante.

14) Avalie a relevância da seguinte consideração na tomada de decisão para instalação de ferrovias e hubs logísticos para integração entre modais: **entender a vocação econômica dos municípios.** Sendo (1) pouco relevante, (2) moderadamente relevante, (3) relevante, (4) muito relevante ou (5) extremamente relevante.

pouco importante moderadamente importante importante muito importante extremamente importante.

15) Avalie a relevância da seguinte consideração na tomada de decisão para instalação de ferrovias e hubs logísticos para integração entre modais: **tecnologias da indústria 4.0 aplicáveis ao segmento.** Sendo (1) pouco relevante, (2) moderadamente relevante, (3) relevante, (4) muito relevante ou (5) extremamente relevante.

pouco importante moderadamente importante importante muito importante extremamente importante.

16) Avalie a relevância do seguinte critério/fator na tomada de decisão para investimentos no setor ferroviário na Bahia: **método científico para localização de ferrovias e hubs entre os**

municípios produtores do estado da Bahia. Sendo (1) pouco relevante, (2) moderadamente relevante, (3) relevante, (4) muito relevante ou (5) extremamente relevante.

pouco importante moderadamente importante importante muito importante extremamente importante.

17) Avalie a relevância do seguinte critério/fator na tomada de decisão para investimentos no setor ferroviário na Bahia: ter o controle das operações ferroviárias e a tomada de decisão centralizadas e através de tecnologias da indústria 4.0. Sendo (1) pouco relevante, (2) moderadamente relevante, (3) relevante, (4) muito relevante ou (5) extremamente relevante.

pouco importante moderadamente importante importante muito importante extremamente importante.