

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA E GESTÃO DO
CONHECIMENTO

WINSTON APARECIDO ANDRADE

ANÁLISE DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE PRODUTOS PERIGOSOS
CLASSE 1 - EXPLOSIVOS: UMA ABORDAGEM UTILIZANDO O MÉTODO FUZZY
AHP

São Paulo

2024

WINSTON APARECIDO ANDRADE

**ANÁLISE DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE PRODUTOS PERIGOSOS
CLASSE 1 - EXPLOSIVOS: UMA ABORDAGEM UTILIZANDO O MÉTODO FUZZY
AHP**

Tese apresentada ao Programa de Pós –
Graduação em Informática – PPGI da
Universidade Nove de Julho – UNINOVE,
como requisito parcial para obter o grau de
Doutor em Informática e Gestão do
Conhecimento.

Prof. Orientador: Dr. André Felipe
Henriques Librantz

**São Paulo
2024**

Andrade, Winston Aparecido.

Análise do transporte rodoviário de produtos perigosos classe 1 – explosivos: uma abordagem utilizando o método Fuzzy AHP. / Winston Aparecido Andrade. 2024.

114 f.

Tese (Doutorado) - Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2024.

Orientador (a): Prof. Dr. André Felipe Henriques Librantz.

1. Transporte rodoviário. 2. Produtos perigosos. 3. Explosivos. 4. Processo hierárquico analítico – AHP. 5. Fuzzy AHP.

I. Librantz, André Felipe Henriques. II. Título.

CDU 004

WINSTON APARECIDO ANDRADE

**ANÁLISE DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE PRODUTOS PERIGOSOS
CLASSE 1 - EXPLOSIVOS: UMA ABORDAGEM UTILIZANDO O MÉTODO FUZZY
AHP**

Presidente Prof. Dr. André F. H. Librantz – Orientador UNINOVE

Membro Interno Prof. Dr. Fabio Henrique Pereira

Membro Interno Prof. Dr. Peterson Adriano Belan

Membro Externo Prof. Dr. Geraldo Cardoso de Oliveira Neto

Membro Externo Prof. Dr. Walter Cardoso Satyro

São Paulo

2024

Dedico este trabalho primeiramente, a Deus que me deu luz e sabedoria para escrever esta pesquisa, força persistência durante a caminhada do curso. Ao meu orientador que me guiou com sabedoria e paciência durante todo o processo de pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos ao meu Orientador, Professor e Doutor André Felipe Henriques Librantz, pela atenção, cuidado e altíssimo profissionalismo que foram dispensados a mim durante todos os momentos da minha orientação, pela excelente pessoa, bem como, pela sua brilhante e notável inteligência. Aos professores do programa de pós-graduação SCRICTO SENSU da UNINOVE, por terem acreditado em mim desde o começo e por me encorajar a seguir em frente, certamente, suas cobranças e ensinamentos foram essenciais para o meu crescimento neste doutorado. Aos amigos Carlos, Dacyr e Érika, pelo companheirismo e colaboração. Também quero agradecer aos colegas Carlos Alberto Lopes e Helbert Barbosa Teles do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) da UNINOVE, os trabalhos desenvolvidos por cada um deles foi a referência inicial para o desenvolvimento da minha pesquisa.

Agradeço à Universidade Nove de Julho pela oportunidade e apoio para alcançar e concluir mais uma etapa em minha carreira profissional e acadêmica.

Quero agradecer a minha esposa Marcia Aparecida de Lima Andrade, pelo companheirismo, compreensão e apoio durante a minha carreira acadêmica e profissional, agradeço a ela pelos trinta e quatro anos de casado e pelos dois filhos maravilhosos Everton e Matheus. Agradeço a minha mãe Mara Geni Andrade (in memoriam) pelo cuidado e dedicação na minha educação.

E, por último, mas, não menos importante do que todos até aqui citados, meus eternos agradecimentos à Deus, aquele que por Sua infinita misericórdia, sempre me capacitou e me abençoou durante minha caminhada nesta terra. À Deus seja toda a glória!

“Vocês perguntam: 'Qual é a nossa meta?'
Posso responder numa única palavra:
'Vitória!' Vitória a todo custo, vitória apesar
de todo o terror, vitória por mais longo e
difícil que o caminho possa ser, pois sem
vitória não há sobrevivência.”

(Winston Churchill)

RESUMO

O transporte rodoviário representa 61,1% do transporte de mercadorias, com uma extensão de 1.721.342 quilômetros da malha rodoviária nacional. A ANTT regula o transporte terrestre de bens e produtos no território brasileiro, incluindo produtos perigosos, em conformidade com a legislação. Setores importantes da economia como a mineração, indústria de petróleo e gás, indústria bélica e a segurança pública compartilham o uso de produtos explosivos e seus derivados, os explosivos pertencem a classe 1 de produtos perigosos e são divididos em seis subclasses, segundo a classificação da Organização das Nações unidas (ONU). A revisão sistemática da literatura revelou como lacuna a falta de pesquisas específicas para essa categoria, principalmente sobre o transporte de explosivos. Enquanto existem estudos sobre produtos perigosos em geral, a abordagem específica aos produtos explosivos é limitada. Esta pesquisa investiga o transporte rodoviário de produtos explosivos, visando identificar, categorizar e hierarquizar os fatores de risco no transporte de explosivos, além de estabelecer uma conexão de interdependência entre os fatores mais relevantes, dentro do contexto de uma análise de decisão multicritério. A aplicação do método Delphi busca identificar critérios relevantes para excluir fatores menos significativos. O uso do método FUZZY AHP (FAHP) proporciona uma abordagem flexível e abrangente, considerando a incerteza desse contexto. A pesquisa preenche uma lacuna na literatura acadêmica sobre gestão de riscos no transporte de produtos explosivos, oferecendo material específico a uma área carente de investigação detalhada. Em termos práticos, os resultados são pertinentes para a indústria de transporte, reguladores e partes interessadas, contribuindo para a tomada de decisões estratégicas e o aprimoramento de políticas de segurança.

Palavras-chave: Transporte rodoviário, Produtos perigosos, Explosivos, Processo Hierárquico Analítico – AHP, FUZZY AHP.

ABSTRACT

Road transport represents 61.1% of freight transport, with a length of 1,721,342 kilometers of the national road network. ANTT regulates the land transport of goods and products within Brazilian territory, including dangerous products, in accordance with legislation. Important sectors of the economy such as mining, the oil and gas industry, the military industry and public security share the use of explosive products and their derivatives, explosives belong to class 1 of dangerous products and are divided into six subclasses, according to the classification of the United Nations (UN). The systematic review of the literature revealed the lack of specific research for this category, mainly on the transport of explosives. While there are studies on dangerous products in general, the specific approach to explosive products is limited. Thus, in this research investigates the road transport of explosive products, aiming to identify, categorize and hierarchize the risk factors in the transport of explosives, in addition to establishing an interdependence on the connection between the most relevant factors, within the context of a multi-criteria decision analysis. The application of the Delphi method seeks to identify relevant criteria to exclude less significant factors. The use of the FUZZY AHP (FAHP) method provides a flexible and comprehensive approach, considering the uncertainty of this context. The research fills a gap in the academic literature on risk management in the transport of explosive products, offering specific material to an area lacking detailed investigation. In practical terms, the results are interesting for the transport industry, regulators and change this, as they can contribute to strategic decision-making and the improvement of safety policies.

Keywords: Road transport, Dangerous products, Explosives, Analytical Hierarchical Process – AHP, FUZZY AHP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tabela de Classificação de Produtos Perigosos	16
Figura 2 – Sequência das etapas na aplicação do método AHP	32
Figura 3 – Estrutura Hierárquica do método AHP	33
Figura 4 – Matriz de Comparações Paritárias do método AHP	39
Figura 5 – Exemplo de Aplicação Lógica FUZZY	48
Figura 6 – Número FUZZY triangular	50
Figura 7 – Fuzzificação dos números da escala de Saaty	51
Figura 8 – Fluxograma de informações fases da revisão sistemática	55
Figura 9 – Estrutura do método das etapas da pesquisa.....	66
Figura 10 – Índice de vidade dos fatores de risco	75
Figura 11 – Modelo gráfico da relação dos fatores de risco	76
Figura 12 – Modelo AHP na escolha da cidade para anova linha de produção.....	82
Figura 13 – Resultado da escolha da nova cidade para linha de produção	89
Figura 14 – Classificação dos fatores de risco segundo o Fuzzy AHP	90
Figura 15 – Resultado da classificação das cidades em função dos fatores	93

LISTA DE QUADRO E TABELAS

Quadro 1 – Diferenças e características Produtos Perigosos e Produtos Explosivos.	17
Quadro 2 – Fatores de risco pouco citados nas pesquisas	67
Quadro 3 – Classificação dos Fatores de risco	80
Tabela 1 – Categoria de severidade dos riscos.....	27
Tabela 2 – Subclasses dos produtos explosivos.....	29
Tabela 3 – Escala do método AHP	35
Tabela 4 – Índice randômico.....	36
Tabela 5 – Tabela de “fuzzificação”	49
Tabela 6 – Artigos produtos perigosos transportados via modal rodoviário	56
Tabela 7 – Artigos que citam materiais explosivos	58
Tabela 8 – Fatores de risco no transporte de produtos perigosos classe 1	69
Tabela 9 – Fatores de risco imprescindíveis no transporte de explosivos.....	72
Tabela 10 – Classificação dos fatores de risco segundo Delphi e IVC	74
Tabela 11 – Agrupamento dos fatores de risco	77
Tabela 12 – Matriz de comparação de fatores de risco.....	80
Tabela 13 – Matriz de comparação de critérios preenchida pelos especialistas	82
Tabela 14 – Cálculo da “fuzzificação” dos fatores de risco	83
Tabela 15 – Cálculo da comparação do fator de risco Condições das rodovias em relação as três cidades	83
Tabela 16 – Cálculo da comparação do fator de risco Comportamento do motorista em relação as três cidades.....	84
Tabela 17 – Cálculo da comparação do fator de risco Condições do veículo em relação as três cidades	84
Tabela 18 – Cálculo da comparação do fator de risco Falta de segurança em relação as três cidades	85
Tabela 19 – Cálculo da comparação do fator de risco Furto em relação as três cidades.....	85
Tabela 20 – Cálculo da comparação do fator de risco Furto em relação as três cidades.....	86
Tabela 21 – Cálculo de normalização dos pesos Fuzzy	86
Tabela 22 – Resultados para a escolha da cidade onde será implantada a nova linha de produção.....	87
Tabela 23 – Classificação do grau de importância de cada fator de risco	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTT	– Agência Nacional de Transportes Terrestres
AHP	– Analytic Hierarchy Process (Processo de Hierarquia Analítica)
CNT	– Confederação Nacional do Transporte
COLOG	– Departamento de Comando Logístico do Ministério da Defesa
FAHP	– FUZZY AHP
IVC	– Índice de Validação de Conteúdo
NTC	– Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística
ONU	– Organização das Nações unidas
QFD	– Desdobramentos das Funções de Qualidade
QRA	– Avaliação Quantitativa de Risco
STRC	– Sistema de Transporte Rodoviário de Cargas
TAPA	– <i>Transport Asset Protection Association</i> (Associação de Proteção de Ativos de Transporte)
TNT	– Trinitrotolueno
TPC	– Tabela de Probabilidade Condicional (<i>Conditional Probability Table</i>)
TRC	– Transporte Rodoviário de Cargas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. PROBLEMA E PERGUNTA DE PESQUISA.....	19
1.2. OBJETIVOS	20
1.2.1. Objetivo Geral.....	20
1.2.2. Objetivos Específicos	21
1.3. JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES.....	21
1.4. ESTRUTURA DA TESE.....	24
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
2.1. PRODUTOS PERIGOSOS.....	26
2.1.1. Diferença entre Produto Perigoso e Carga Perigosa.....	26
2.2. DESCRIÇÃO SOBRE RISCO.....	27
2.3. FATORES DE RISCO.....	28
2.4. TRANSPORTE RODOVIÁRIO	28
2.5. EXPLOSIVOS.....	29
2.6. MÉTODO DELPHI	30
2.7. <i>Analytic Hierarchy Process</i> – AHP.....	32
2.7.1. Etapas Método <i>Analytic Hierarchy Process</i> – AHP	34
2.7.2. Fundamentação Axiomática do Método <i>Analytic Hierarchy Process</i> – AHP 38	
2.7.3. Decisões tomadas por um grupo de especialistas.....	47
2.8. Lógica <i>FUZZY</i>	48
2.9. <i>FUZZY Analytic Hierarchy Process</i> - FAHP	49
2.9.1. Definições sobre a fuzzificação e a triangularização no método FAHP	52
2.9.2. Fundamentação Axiomática do Método Fuzzy <i>Analytic Hierarchy Process</i> – FAHP	53
3. TRABALHOS CORRELATOS	55
3.1. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....	55
3.2. TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE PRODUTOS PERIGOSOS	60
3.2.1. Riscos no Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos	61
3.2.2. Legislação Nacional sobre o Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos Classe 1 – Explosivos.....	63
3.2.3. Aplicação do Método FAHP no transporte de produtos perigosos.....	64

4. METODOLOGIA DE PESQUISA.....	66
4.1. MÉTODO DE PESQUISA.....	66
4.2. 2ª ETAPA	67
4.2.1. Identificação dos Fatores de Risco na Literatura	67
4.3. 3ª ETAPA	72
4.3.1. Atribuição dos Graus de Importância dos Fatores de Risco utilizando o Método DELPHI.....	72
4.3.2. Seleção dos Fatores de Risco Utilizando o Cálculo do IVC – Índice de Validade de Conteúdo	74
4.4. 4ª ETAPA	76
4.4.1. Relação de Interdependência dos Fatores de Risco	76
4.4.2. Validação da Relação de Interdependência dos Fatores de Risco	77
4.4.3. Agrupamento dos Fatores de Risco	77
4.4.4. Agrupamento do Fator de Risco Roubo.....	78
4.4.5. Agrupamento do Fator de Risco Acidente.....	79
4.4.6. Aplicação do Método Fuzzy AHP para Hierarquização Fatores de Risco ..	80
5 ESTUDO DE CASO APLICADO À INDÚSTRIA QUÍMICA	83
5.1 Utilização do Método Fuzzy AHP no Estudo de Caso da Indústria Química..	84
5.1.1. Hierarquização Fatores de Risco.....	89
5.1.2. Resultado proposto pelo método Fuzzy AHP para a escolha da cidade.....	90
5.1.3. Aplicação de um questionário para os responsáveis da empresa sobre a utilização do método	91
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	92
6.1 Classificação dos Fatores de Risco	92
6.2 Resultados do Estudo de Caso.....	93
6.3 Análise dos Resultados.....	94
7 DISCUSSÃO	98
8 CONCLUSÃO.....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102

1. INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário no Brasil é o modal de transporte mais utilizado, formando a base do sistema logístico do país. O Brasil possui uma extensa rede de estradas e rodovias, com um total de 1.721.342 quilômetros, que o coloca como o quarto maior do mundo nesse aspecto. Essas vias são responsáveis por cerca de 61,1% do transporte de mercadorias em todo o território nacional. O sistema de rodovias é o meio predominante para o transporte de cargas e passageiros em todo o país (CNT, 2023).

No Brasil, a ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres) atua como o órgão regulador do transporte terrestre, seguindo uma estrutura que abrange a regulação de diversos tipos de mercadorias, incluindo produtos perigosos. Ela está em conformidade com a legislação ambiental em vigor e estabelece as responsabilidades e penalidades por infrações, tanto para embarcadores quanto para transportadores, independentemente da natureza das mercadorias transportadas (ANTT, 2018).

Nos últimos anos, no contexto do Transporte Rodoviário de Cargas (TRC), especialmente no que diz respeito ao transporte de produtos perigosos, devido à sua inerente complexidade e riscos envolvidos, a aplicação de análises quantitativas tem tido êxito em estudos que visam avaliar os riscos associados a setores responsáveis pela produção de produtos perigosos, como a indústria química (YANG *et al.*, 2018a).

Estudos anteriores como Beczkowska (2019) e Mohammadfam (2020) já evidenciaram a relevância do transporte de materiais perigosos em vários modais, como estradas, ferrovias, oleodutos e vias navegáveis interiores, na determinação do risco global de uma região.

Simultaneamente à contribuição significativa do transporte rodoviário de cargas para a atividade econômica global, é relevante destacar o impacto que esse modal pode gerar quando há situações que envolvem acidentes, roubos ou mesmo ambos, devido à probabilidade de uma interação complexa de diversos fatores de risco (TANACKOV *et al.*, 2018).

Os acidentes envolvendo caminhões não só provocam interrupções no fluxo de tráfego, mas também resultam em prejuízos econômicos (DITTA *et al.*, 2019). Além

disso, as colisões com caminhões estão associadas a um considerável número de lesões e mortes, devido a fatores adicionais como as dimensões maiores dos veículos, o peso elevado e, no caso do transporte de produtos perigosos, a potencial liberação de materiais com tais características (HOLECZEK, 2019).

Outra situação que causa preocupação na atividade do transporte rodoviário de cargas é o roubo, frequentemente motivado por fatores relacionados à própria atividade, como o tipo de mercadoria transportada, a falta de segurança relacionada a responsabilidades dos órgãos de segurança estatais e o comportamento do motorista (HELBERT TELES, 2020).

No setor de transporte de cargas, especialmente no transporte rodoviário, encontramos os chamados "*produtos de alto interesse*", que são, na realidade, produtos mais atrativos (CNT, 2018). Esses produtos se destacam por serem fáceis de ocultar, remover, amplamente disponíveis, valiosos, desejáveis e dispensáveis. Isso aumenta a probabilidade de roubo desses produtos, tornando necessária uma atenção especial durante o transporte (MESQUITA FEITOZA; ALVES JUNIOR, 2020).

Portanto, ao examinar os fatores de risco mais comuns na atividade do transporte rodoviário de cargas, os acidentes e roubos podem ser compreendidos como resultados da interação desses diversos fatores.

Produtos perigosos, também conhecidos como materiais perigosos, são substâncias ou objetos que, devido às suas características químicas, físicas ou biológicas, representam riscos significativos à saúde humana, ao meio ambiente e à segurança pública durante o seu manuseio, transporte, armazenamento e uso (HOLECZEK, 2019). Esses produtos podem incluir substâncias químicas tóxicas, inflamáveis, explosivas, corrosivas, radioativas, biológicas, entre outras (HUANG *et al.*, 2020).

Produtos perigosos são classificados de acordo com sistemas de regulamentação específicos, como o Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (GHS) da Organização das Nações Unidas (ONU) conforme mostrado na figura 1, ou os regulamentos de transporte de produtos perigosos, como o ADR (Europa), o DOT (Estados Unidos), o RID (ferrovias na Europa) e a ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres) no Brasil.

Figura 1: Tabela de classificação de Produtos Perigosos

Produtos Perigosos	Classe 1 - Explosivos	Subclasses: 1.1 – 1.2 – 1.3 – 1.4 – 1.5 – 1.6
	Classe 2 - Gases	Subclasses: 2.1 – 2.2 – 2.3
	Classe 3 – Líquidos Inflamáveis	Não possuiu subclasses
	Classe 4 - Sólidos inflamáveis, substâncias sujeitas à combustão espontânea; e substâncias que, em contato com água, emitem gases inflamáveis	Subclasses: 4.1 – 4.2 – 4.3
	Classe 5 – Substâncias oxidantes e peróxidos orgânicos	Subclasses: 5.1 – 5.2
	Classe 6 – Substâncias tóxicas e substâncias infectantes	Subclasses: 5.1 – 5.2
	Classe 7 – Material radioativo	Não possuiu subclasses
	Classe 8 – Substâncias corrosivas	Não possuiu subclasses
	Classe 9 – Substâncias e artigos perigosos diversos, incluindo substâncias que apresentem risco para o meio ambiente	Não possuiu subclasses

Fonte: Adaptado da Resolução 5.947/2021 ANTT (Agência Nacional de Transporte Terrestres)

A tabela de classificação de produtos perigosos é utilizada no âmbito da segurança industrial, transporte e manuseio de substâncias que representam riscos para a saúde humana, o meio ambiente e a segurança pública, ela é utilizada para categorizar e identificar os perigos associados a diferentes produtos e materiais.

Neste contexto, o transporte, manuseio e armazenamento de produtos perigosos estão sujeitos a regulamentações rigorosas para garantir a segurança de todas as partes envolvidas e minimizar os riscos de acidentes que possam causar danos à saúde, ao meio ambiente e à infraestrutura (WALENDZIK *et al.*, 2021).

A literatura mostra que inúmeros fatores de risco são identificados na atividade do transporte rodoviário de produtos perigosos (HAFIZ; AKBAR, 2018), estes fatores são vistos por meio de situações muitas vezes recorrentes e, por estarem intrinsicamente ligados a esta atividade, é relevante que sejam identificados, classificados segundo seu grau de importância/relevância, seja estabelecida a relação de interdependência entre os fatores de risco e por fim sejam hierarquizados (XING *et al.*, 2020).

A modelagem destes fatores de risco é feita com o propósito de uniformizá-los para serem utilizados em um método de decisão multicritério como o AHP (Analytic Hierarchy Process) (DITTA *et al.*, 2019; YANG *et al.*, 2018a). Porém, a literatura por

meio dos autores pesquisados, mostra que os fatores de risco são tratados de forma genérica sem diferenciar o tipo de produto e sua classe, de maneira isolada e com métodos distintos, como se observou nos artigos que foram estudados (TANACKOV *et al.*, 2018; XING *et al.*, 2020).

Nesse ponto é importante responder a uma pergunta que está implícita no texto, “Qual a diferença entre produtos perigosos e produtos explosivos?”:

Produtos perigosos e produtos explosivos são categorias distintas, mas alguns produtos perigosos podem incluir substâncias explosivas. Suas diferenças e características podem ser vistas no quadro 1.

Quadro 1: Diferenças e características Produtos Perigosos e Produtos Explosivos

Produtos Perigosos	Produtos Explosivos
Definição Geral: Produtos perigosos referem-se a substâncias ou materiais que podem representar riscos à saúde humana, ao meio ambiente ou à propriedade.	Definição Geral: Produtos explosivos são substâncias ou dispositivos que têm a capacidade de liberar uma quantidade significativa de energia rapidamente na forma de calor, luz, som e gases.
Abrangência: Essa categoria engloba uma ampla variedade de substâncias, incluindo produtos químicos tóxicos, inflamáveis, corrosivos, radioativos, entre outros.	Abrangência: Esta categoria é específica para substâncias que têm a capacidade de explosão, seja de forma controlada, como nos explosivos industriais, ou de forma não controlada, como nos acidentes.
Exemplos: Ácidos corrosivos, substâncias tóxicas, materiais radioativos, gases inflamáveis, entre outros.	Exemplos: Dinamite, TNT, pólvora, nitroglicerina, entre outros.

DIFERENÇAS

Abrangência: Produtos perigosos são uma categoria mais ampla que inclui diversos tipos de substâncias perigosas, enquanto produtos explosivos se referem especificamente a substâncias capazes de explodir.

Riscos Associados: Produtos perigosos podem representar riscos diversos, como toxicidade, inflamabilidade, corrosividade, entre outros, enquanto produtos explosivos se concentram no risco de explosão.

Utilização: Produtos perigosos podem ter várias aplicações industriais, comerciais ou domésticas, enquanto produtos explosivos são geralmente usados em setores específicos, como mineração, construção e militares.

Produtos perigosos abrangem uma variedade de substâncias com riscos diversos, enquanto produtos explosivos se referem especificamente a substâncias que têm a capacidade de explodir. Produtos perigosos podem incluir produtos explosivos, mas nem todos os produtos perigosos são explosivos.

A revisão da literatura também indica que os produtos perigosos da classe 1, que englobam explosivos, são submetidos aos mesmos critérios utilizados para as demais classes de produtos perigosos, apesar do fato de que esta classe possui a maior quantidade de subclasses e apresenta características distintas em termos de produção, transporte e armazenamento (AYYILDIZ; TASKIN, 2021; LIEGGIO JUNIOR et al., 2012).

É neste contexto que este trabalho procurou analisar, dentro de um conjunto de variáveis e diferentes cenários característicos do transporte rodoviário desse tipo de carga, as condições e a relação de interdependência dos fatores de risco comuns à esta atividade e, assim, apresentar um modelo utilizando o método Fuzzy AHP (FAHP) (FELISONI et al., 2021; WAGNER PIETROBELLI BUENO et al., 2019) .

1.1. PROBLEMA E PERGUNTA DE PESQUISA

A investigação e análise dos fatores de risco ligados ao transporte rodoviário de produtos perigosos têm sido abordadas em inúmeras pesquisas e publicações científicas (HUANG *et al.*, 2021; ZHANG, 2018). No entanto, é relevante observar que a classe 1, que inclui produtos explosivos, carece de pesquisas específicas a respeito de seus fatores de risco, os quais se diferenciam, em parte, dos produtos perigosos em geral.

Essa situação pode ser compreendida porque os explosivos são associados e descritos como produtos perigosos, dessa forma eles não são diferenciados dos demais produtos classificados na tabela específica (LUNDIN, 2018). Isso ocorre devido às suas características, que frequentemente resultam na sua inclusão na categoria de outros produtos como combustíveis e produtos químicos, embora não sejam fabricados com a finalidade de serem explosivos (HUANG; ZHANG, 2021).

Os produtos explosivos, em particular, demandam uma atenção especial, dado seu elevado potencial de causar danos significativos, juntamente com consequências imprevisíveis devido à sua natureza explosiva (ILICI *et al.*, 2021). No entanto, a

abordagem predominante nas pesquisas sobre riscos na área se caracteriza por uma análise genérica das categorias de produtos perigosos, negligenciando uma investigação detalhada dos fatores de risco associados aos produtos da classe 1, que englobam explosivos e suas seis subclasses (REN *et al.*, 2012).

Autores como Diaz (2022), Huang, (2021) e Zhang, (2018), pesquisaram produtos perigosos como combustíveis, químicos, gases inflamáveis e outros da classe 4 “sólidos inflamáveis, substâncias sujeitas a combustão espontânea, substâncias que em contato com a água emitem gases inflamáveis e com propriedades explosivas em algumas situações.

A distinção entre os danos causados por acidentes com produtos explosivos e produtos perigosos em geral reside no fato de que os produtos explosivos são projetados para liberar uma grande quantidade de energia em um curto período, enquanto os produtos perigosos em geral podem causar danos devido à exposição prolongada ou ao contato com o produto (LIU *et al.*, 2021). Os produtos perigosos abrangem substâncias químicas tóxicas, inflamáveis, corrosivas e radioativas, enquanto os produtos explosivos englobam dinamite, Trinitrotolueno (TNT) e outros materiais explosivos militares (MA *et al.*, 2018).

Em que medida um modelo de decisão baseado em multicritérios, que incorpora os principais fatores de risco associados ao transporte rodoviário de explosivos, pode contribuir para aprimorar a segurança, prevenir incidentes e apoiar o processo decisório?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Identificar, categorizar e hierarquizar os elementos de risco no transporte de explosivos com base em sua importância, desenvolver um modelo para a avaliação, prevenção e gerenciamento dos fatores de risco, dentro do contexto de uma análise de decisão multicritério.

1.2.2. Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, procura-se explorar:

- I. Identificar na literatura, os principais fatores de risco mais recorrentes no transporte rodoviário de produtos explosivos;
- II. Atribuir e validar o grau de importância dos fatores de risco conforme a necessidade do transporte de produtos explosivos;
- III. Validar junto aos especialistas o grau de importância dos fatores de risco;
- IV. Estabelecer a relação de interdependência dos fatores de risco devido a possibilidade de ocorrerem de forma simultânea;
- V. Hierarquizar os fatores de risco utilizando o método Fuzzy AHP;

1.3. JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES

Na literatura os trabalhos publicados sobre produtos perigosos não especificam a classe de produtos explosivos, pesquisas realizadas em programas de pós-graduação *Stricto Sensu* com produtos específicos utilizados em explosões como o Nitrato de Amônio não apresentam a classificação de produtos perigosos da ONU, muito menos a classificação desse produto como explosivo (DE PONTES, 2013; MUNARETTI, 2002).

Outras pesquisas sobre explosivos e as leis sobre o transporte de produtos perigosos também descrevem os explosivos como “produtos perigosos” (SARTORI; CORDEIRO, 2021).

Um exemplo a ser demonstrado são as estatísticas de acidentes registradas no site oficial da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), em sua página onde são disponibilizadas as informações sobre acidentes com produtos perigosos existe uma incoerência.

No formulário a ser preenchido no campo “produto” há quatro opções para o Nitrato de Amônio, esse produto é a matéria prima para fertilizantes e também para explosivos, pode-se observar a coerência em oferecer quatro opções desse mesmo

produto, cada uma delas para uma situação específica.

1ª NITRATO DE AMONIO, contendo até 0,2% de substâncias combustíveis;

2ª NITRATO DE AMONIO, EMULSÃO ou SUSPENSÃO ou GEL, explosivo intermediários para detonantes;

3ª NITRATO DE AMONIO, FERTILIZANTES;

4ª NITRATO DE AMONIO, LÍQUIDO;

Quando selecionada a segunda opção para verificar as estatísticas sobre acidentes, as informações são disponibilizadas, porém o produto é descrito como da classe/subclasse 5.1 (substâncias oxidantes e peróxidos orgânicos) ou da classe 3 (líquidos inflamáveis) (CETESB, 2024).

Esses são alguns exemplos da forma como os explosivos são vistos na classificação de produtos perigosos.

Os principais setores da economia global que empregam explosivos incluem a mineração (SADEROVA, et al., 2020), a construção civil (JOHAN, 2018) e a indústria de petróleo e gás (MORAIS, et al., 2022). No setor de mineração, os explosivos são amplamente utilizados para a fragmentação de rochas e a extração de minérios. Na construção civil, sua aplicação abrange a demolição controlada de edifícios, bem como a escavação de túneis e projetos subterrâneos.

Na indústria de petróleo e gás, os explosivos são utilizados para perfuração de poços e para a sísmica de exploração. Outros setores que utilizam explosivos incluem a indústria bélica e de defesa, a indústria química e a indústria de pirotecnia (YANG *et al.*, 2018b).

O setor de mineração de metais destinados às baterias de carros elétricos está enfrentando um aumento na demanda por explosivos. As principais fabricantes desses veículos preveem uma escassez global de níquel, cobre e outros minerais utilizados nas baterias, devido à falta de investimento no setor de mineração (MARTINS, 2022). A indústria global de mineração passa por mudanças significativas com o aumento da demanda por minerais críticos.

A mudança de comportamento global em direção ao maior consumo de produtos tecnológicos, especialmente com a projeção de aumento do uso de carros elétricos, deve impulsionar ainda mais a extração de lítio, níquel, manganês, cobalto

e óxido de alumínio. Como resultado, a demanda por explosivos deve acompanhar essas tendências de crescimento (JOAQUIM, 2023).

Conforme Lakehal e Tachi, (2018), o transporte e o armazenamento dos explosivos envolvem desafios complexos e implicam riscos substanciais. Nesse cenário, as empresas do setor de transporte rodoviário manifestam interesse e preocupação, especialmente em relação aos fatores de risco que podem impactar o transporte de carga. Isso ocorre porque interrupções no transporte entre o fornecedor e o distribuidor também influenciam a eficiência da cadeia de suprimentos (MA *et al.*, 2022).

A pesquisa propõe abordar uma lacuna no atual conhecimento sobre os riscos associados ao transporte rodoviário de produtos explosivos. A falta de investigação específica sobre essa classe de produtos, demonstra a escassez de conhecimento teórico em uma área que também revela importância indireta devido ao crescimento de atividade econômica da mineração.

Além disso, a importância de compreender as peculiaridades dos materiais explosivos colabora preenchendo a lacuna de conhecimento teórico e a possibilidade de ampliar o número de pesquisas na área (MOHAMMADFAM *et al.*, 2020; SANTIS; MARCIANO, 2020; TORRETTA *et al.*, 2017). Portanto, esta pesquisa se justifica contribuindo para o conhecimento teórico do transporte rodoviário de produtos explosivos e consequentemente trás contribuições práticas podendo melhorar a tomada de decisão nas empresas.

A presente pesquisa visa ampliar o conhecimento acadêmico sobre o transporte de produtos explosivos, e consequentemente colaborar com gestão de riscos nessa área. A seguir são listadas as contribuições teóricas e práticas.

Contribuições Teóricas

1. **Aprofundamento (investigação) do Entendimento:** A pesquisa permitirá o aprofundamento no conhecimento científica e acadêmico das complexidades inerentes aos riscos relacionados a produtos explosivos. Isso é particularmente relevante devido à falta de investigações específicas nesse contexto.
2. **Preenchimento de Lacuna na Literatura:** A pesquisa aborda uma lacuna na literatura sobre gestão de riscos no transporte rodoviário de produtos explosivos, fornecendo informações e entendimento em uma área que carece

de investigação detalhada.

3. **Desenvolvimento de Modelos:** A pesquisa fundamenta as bases teóricas no desenvolvimento de um modelo de apoio a decisão para prever o comportamento de produtos explosivos em diferentes cenários de transporte.
4. **Combinação de Técnicas:** Possibilitar a combinação na utilização das técnicas FAHP preenchendo as lacunas e subjetividade do AHP, método DELHPI, proporcionando a seleção dos fatores de risco mais relevantes, dentre os que foram pesquisados na literatura, para o transporte rodoviário de produtos perigosos, utilização do IVA para classificar os fatores de risco relevantes.

Contribuições Práticas

5. **Identificação dos Fatores de Risco:** Identificação dos fatores de risco mais relevantes, proporcionando maior assertividade na criação de ações mitigatórias dos riscos no transporte rodoviário de produtos explosivos.
6. **Aprimoramento da Segurança:** A pesquisa tem o potencial de contribuir para o desenvolvimento de estratégias eficazes. Isso, por sua vez, pode melhorar a segurança no transporte rodoviário de produtos explosivos, reduzindo o risco de incidentes prejudiciais.
7. **Relevância para a Indústria e Regulamentação:** Os resultados da pesquisa são relevantes para a indústria de transporte, reguladores e partes interessadas. As diretrizes e informações fornecidas podem ser aplicadas para aprimorar políticas e práticas de segurança.
8. **Promoção da Sustentabilidade:** A melhoria da segurança no transporte de produtos explosivos pode ter implicações ambientais, ao reduzir o potencial de acidentes que poderiam causar danos ao meio ambiente.

1.4. ESTRUTURA DA TESE

A presente tese foi estruturada em 7 (sete) capítulos distintos sendo estas apresentadas da seguinte maneira:

⇒ Capítulo 1: Apresentam-se a introdução, problema e pergunta de

pesquisa, objetivos, justificativas e contribuições e estrutura do trabalho;

- ⇒ Capítulo 2: Fundamentação teórica, apresentando e discutindo as teorias, conceitos, modelos, estudos anteriores e pesquisas relevantes que servirão como base para o desenvolvimento da tese;
- ⇒ Capítulo 3: Revisão da literatura, na qual é realizada uma revisão bibliográfica sobre o transporte rodoviário de cargas e seus fatores de risco, bem como, o uso do FAHP na análise do transporte rodoviário de produtos perigosos e explosivos;
- ⇒ Capítulo 4: Metodologia de pesquisa, apresentando o conjunto de abordagens, técnicas, métodos e procedimentos utilizados para realizar a pesquisa de maneira sistemática e rigorosa;
- ⇒ Capítulo 5: Estudo de caso aplicado a indústria química;
- ⇒ Capítulo 6: Análise dos resultados e discussão;
- ⇒ Capítulo 7: Conclusão, que consiste nos resultados qualitativos obtidos com o desenvolvimento do estudo e as sugestões de estudos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo é apresentada a fundamentação teórica dos temas utilizados nesta pesquisa.

2.1. PRODUTOS PERIGOSOS

Os produtos perigosos são definidos como qualquer substância ou material capaz de causar danos às pessoas, propriedades e ao meio ambiente (CHEN *et al.*, 2020; PATEL; SOHANI, 2016). Os produtos perigosos se referem a explosivos, gases tóxicos, inflamáveis líquidos e sólidos, resíduos perigosos e substâncias oxidantes (BERNATIK *et al.*, 2021; MACHADO *et al.*, 2018, p. 15).

Conforme estabelecido pela ANTT (2023), a definição de produto perigoso abrange qualquer material que apresente riscos à saúde das pessoas, ao meio ambiente e à segurança pública, independentemente de sua origem natural ou processo de produção. De acordo com ACCETTURA *et al.*, (2014) a categorização dos produtos perigosos se baseia na natureza dos danos que podem causar, e conforme estipulado pela ONU (2013), esses produtos se enquadram em nove classes. No entanto, este estudo concentra-se na investigação da Classe 1 - Explosivos.

De acordo com as diretrizes da ONU (2013), os produtos perigosos são classificados em nove categorias com base em suas propriedades. Essas categorias incluem: 1 - Explosivos; 2 - Gases; 3 - Combustíveis líquidos e inflamáveis; 4 - Sólidos inflamáveis e combustíveis, especialmente quando em contato com líquidos; 5 - Óxidos e peróxidos orgânicos; 6 - Materiais tóxicos e substâncias infectantes; 7 - Materiais radiativos; 8 - Materiais corrosivos; 9 - Outros materiais perigosos diversos.

Esses produtos, em suas diversas formas, desempenham um papel significativo na sociedade moderna e geralmente são fabricados ou originados em locais diferentes de seu destino (RADA *et al.*, 2017).

2.1.1. Diferença entre Produto Perigoso e Carga Perigosa

Como mencionado anteriormente, conforme a definição da ANTT (2023), um Produto Perigoso é caracterizado como qualquer material que envolve riscos à saúde humana, ao meio ambiente ou à segurança pública, independentemente de sua origem natural ou processo de produção, seja em contexto de transporte ou não. Por

outro lado, uma Carga Perigosa refere-se à combinação de vários produtos perigosos compatíveis, seja acondicionada em embalagens ou transportada a granel, e apresenta riscos somente quando está em trânsito.

Holeczek (2019) apresenta um exemplo prático que ilustra a distinção entre um produto perigoso e uma carga perigosa: um rotor de uma turbina, frequentemente com peso superior a cem toneladas, é considerado uma carga perigosa durante o transporte, mas não é classificado como um produto perigoso enquanto aguarda o carregamento no pátio da empresa fabricante. Por outro lado, uma bomba de ácido clorídrico é sempre considerada um produto perigoso, independentemente de estar ou não em processo de transporte (TANACKOV *et al.*, 2018).

Portanto, é possível afirmar que um produto perigoso é sempre uma carga perigosa, mas o inverso nem sempre é verdadeiro, ou seja, nem toda carga perigosa é necessariamente um produto perigoso (FONTAINE; MINNER, 2018).

2.2.DESCRICÃO SOBRE RISCO

É possível afirmar que o risco é uma característica natural de qualquer decisão e, adicionalmente, é avaliado com base na combinação de diversos fatores, como gravidade, ocorrência, exposição, oportunidades de prevenção, entre outros (YU *et al.*, 2022). No entanto, é comum que essa avaliação seja simplificada para considerar principalmente três fatores: a gravidade, a probabilidade de ocorrer um possível acidente prejudicial, ocasionalmente incluindo o elemento de exposição e a severidade do risco (LI *et al.*, 2019).

Vale destacar que a severidade do risco se refere à extensão dos danos ou impactos adversos que podem ocorrer como resultado de um evento indesejado ou de uma situação de risco (GENG *et al.*, 2023). Em termos simples, a severidade indica o quão grave ou significativo é o potencial dano decorrente de um determinado risco e pode ser categorizada em quatro tipos, conforme exposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Categorias de Severidade dos Riscos

CATEGORIA	TIPO	CARACTERÍSTICA
I	Desprezível	Lesões leves (retorno imediato ao trabalho), danos leves aos equipamentos, não prejudicial ao meio ambiente.
II	Marginal	Lesões com incapacidade parcial leve, danos leves aos equipamentos e instalações, danos ao meio ambiente facilmente recuperável.
III	Crítica	Lesões graves com incapacidade parcial grave, perda do equipamento, danos sérios às instalações, grandes perdas financeiras, danos sérios ao meio ambiente.
IV	Catastrófica	Morte, incapacidade permanente total, perda do equipamento/instalações, danos graves ao meio ambiente (não recuperável).

Fonte: Adaptado Geng (2003)

A categorização da severidade de riscos possibilita a avaliação das consequências e dos danos, provocados por acidentes decorrentes do transporte de produtos explosivos

2.3. FATORES DE RISCO

Fatores de risco no transporte rodoviário de produtos perigosos referem-se a elementos, condições ou circunstâncias que podem aumentar a probabilidade de acidentes, incidentes ou eventos adversos envolvendo o transporte de substâncias perigosas nas estradas (ŞENCAN; YAVUZ, 2017). Esses fatores podem variar amplamente e incluir diversos aspectos relacionados ao processo de transporte. Alguns exemplos de fatores de risco nesse contexto são: Condições das rodovias, Comportamento do motorista, Condições de tráfego, Condições do veículo, Falta de segurança e Excesso de velocidade (BUBBICO *et al.*, 2004).

2.4. TRANSPORTE RODOVIÁRIO

O "Transporte Rodoviário" refere-se a uma modalidade de transporte terrestre realizada por veículos automotores, como automóveis, ônibus, caminhões e carretas, que operam em autoestradas e rodovias, vias pavimentadas a nível regional ou nacional. Esses meios de transporte deslocam tanto pessoas quanto cargas em

distâncias curtas a médias, sendo amplamente adotados e populares no Brasil e em diversas partes do mundo (XIA *et al.*, 2020).

O transporte rodoviário destaca-se por sua flexibilidade em termos de itinerários, permitindo o acesso a uma ampla variedade de regiões e oferecendo agilidade, embora sua capacidade para o transporte de mercadorias e passageiros seja limitada (BĘCZKOWSKA, 2019). Por outro lado, o frete e a implementação desse tipo de transporte tendem a ser mais econômicos em comparação a outras modalidades, embora os custos de manutenção e combustível sejam consideráveis (TORRETTA *et al.*, 2017).

No entanto, o transporte rodoviário apresenta desvantagens, incluindo um significativo impacto ambiental que resulta em uma considerável poluição do ar e ruído, originada pelos veículos automotores (FAN *et al.*, 2015). O congestionamento de tráfego, a frequência de roubos e assaltos a caminhões de carga, juntamente com a condição precária de muitas rodovias, contribuem para uma série de problemas nessa modalidade de transporte, culminando em um aumento de acidentes (TASLIMI *et al.*, 2017).

2.5. EXPLOSIVOS

Segundo a ONU (2013), os materiais perigosos são divididos em 9 classes e a classe dos produtos explosivos (classe 1) é dividida em seis Subclasses, conforme a tabela 2.

Apesar da descrição das subclasses demonstrar menor grau de periculosidade em relação a acidentes, existe a necessidade de se identificar de forma clara e precisa as subclasses para o acondicionamento e a escolha das embalagens corretas, segundo a resolução 420 da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), de 12 de fevereiro de 2004 a classificação das substâncias na classe 1 como subclasse leva em conta sua alocação em grupos de compatibilidade (ANTT, 2004).

Os grupos de compatibilidade são diretamente influenciados pelo tipo de embalagem e produto que serão transportados, dessa forma as subclasses são transportadas de forma segura minimizando seu potencial explosivo e possibilitando o transporte seguro e otimizado do material.

Tabela 2 : Subclasses dos Produtos Explosivos

Produtos Explosivos Classe 1: Subclasses	
1.1	Substâncias e artigos com risco de explosão em massa
1.2	Substâncias e artigos com risco de projeção, mas sem risco de explosão em massa
1.3	Substâncias e artigos com risco de fogo e com pequeno risco de explosão ou de projeção, ou ambos, mas sem risco de explosão em massa
1.4	Substâncias e artigos que não apresentam risco significativo
1.5	Substâncias muito insensíveis, com risco de 39 explosões em massa
1.6	Artigos extremamente insensíveis, sem risco de explosão em massa

Fonte: Adaptado da Resolução 5.947/2021 ANTT (Agência Nacional de Transporte Terrestres)

No Brasil, as normas para o transporte desses materiais são regidas pelas diretrizes da ANTT e pelo Exército Brasileiro. O Exército Brasileiro, em particular, por meio do Ministério da Defesa e do Departamento de Comando Logístico (COLOG), estabelece as diretrizes relacionadas à produção, transporte e comércio de explosivos em sua portaria número 42, datada de 28 de março de 2018. Essas diretrizes incluem disposições específicas sobre o Transporte de Materiais Perigosos, cujos critérios podem ser resumidos da seguinte forma:

1. As Guias de Tráfego (GT) só podem ser emitidas para empresas devidamente registradas no Exército e utilizarem explosivos, bombeáveis ou derramáveis apostilada em seu registro;

2. O transporte de diferentes explosivos se dará por grupo de compatibilidade; todo veículo de transporte deve possuir telefone celular ou rádio privativo, além do sistema de rastreamento em tempo real;

3. Outras diretrizes normativas (COLOG, 2018).

2.6.MÉTODO DELPHI

O uso do método Delphi na etapa inicial deste estudo permitiu a identificação e organização dos fatores de risco relevantes para o objetivo proposto.

O método Delphi é uma abordagem de pesquisa e tomada de decisão que se baseia na obtenção de consenso ou avaliações de um grupo de

especialistas em um determinado campo ou tópico (ROWE e WRIGHT, 2011). Foi desenvolvida originalmente pela RAND Corporation na década de 1950, com aplicações iniciais em contextos militares, mas desde então tem sido amplamente adotada em diversas áreas, incluindo negócios, educação, saúde, engenharia, entre outras (KINJO, 2021).

Sua principal característica é a obtenção das opiniões de especialistas de forma anônima e iterativa. O processo envolve várias rodadas de questionários ou consultas, com cada rodada sendo baseada nas respostas da rodada anterior. Isso permite que os especialistas reavaliem suas opiniões à medida que o processo avança, buscando gradualmente alcançar um consenso ou um acordo sobre um tópico específico (MARQUES; FREITAS, 2018a).

Algumas das características distintivas do método Delphi incluem:

1. Anonimato: Os especialistas participam de forma anônima, o que reduz a influência de hierarquias ou pressões sociais nas respostas.
2. Iteração: O processo envolve múltiplas rodadas de consulta, permitindo que os especialistas revejam e ajustem suas respostas com base no feedback das rodadas anteriores.
3. Avaliação qualitativa e quantitativa: O método Delphi combina elementos qualitativos e quantitativos, permitindo a coleta de opiniões e a análise estatística das respostas.
4. Diversidade de opiniões: O método Delphi é útil para lidar com questões complexas e para obter uma variedade de perspectivas de especialistas.
5. Busca por consenso: O objetivo geral é alcançar um nível de consenso entre os especialistas, mas o processo também pode identificar áreas de discordância que podem ser exploradas em rodadas subsequentes.

O método Delphi é utilizado em pesquisa acadêmica, previsão de tendências, tomada de decisões em grupo e resolução de problemas complexos. É particularmente útil quando não existe um consenso claro sobre um tópico e quando é necessário obter a visão de especialistas qualificados

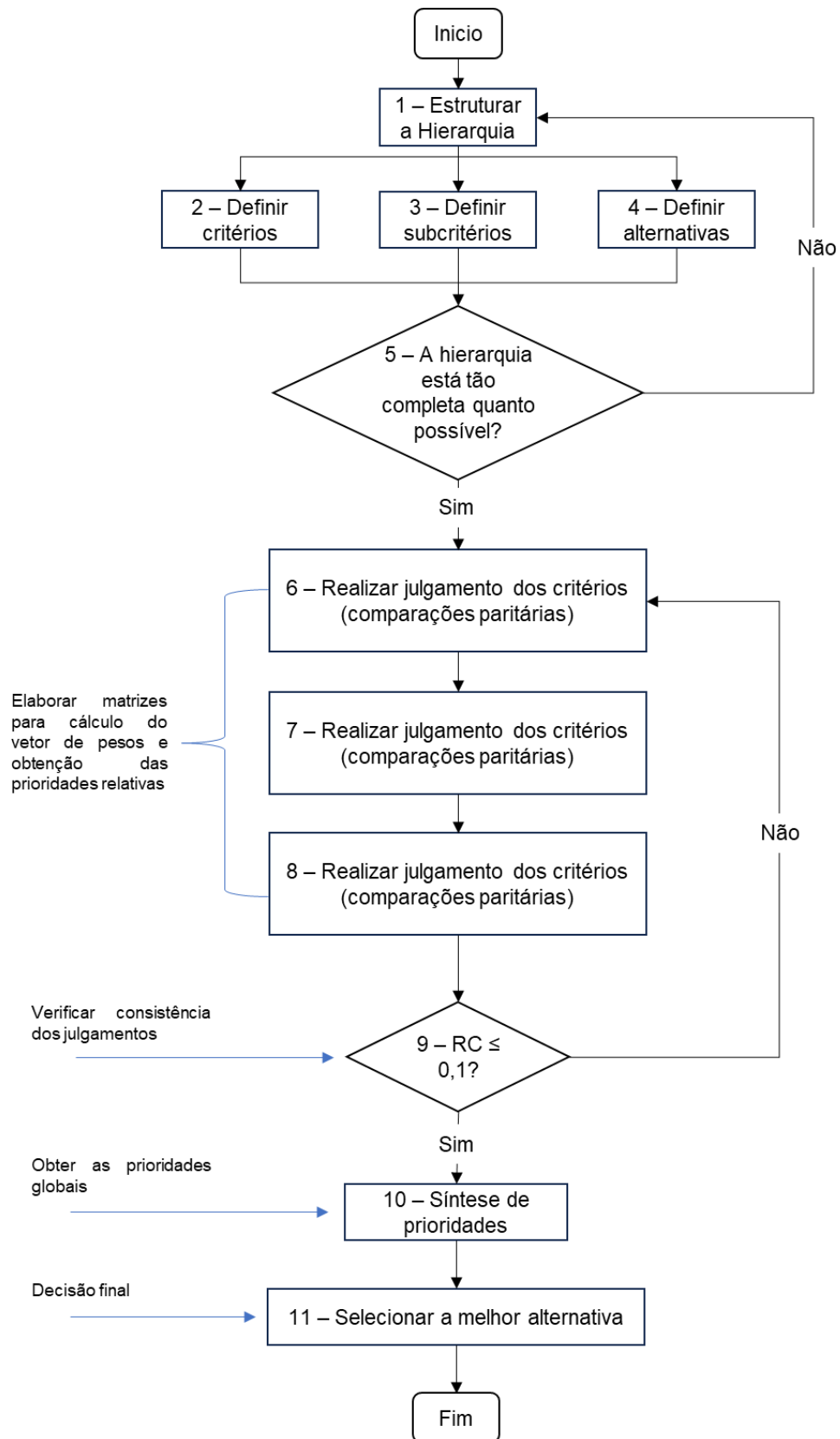
(BEATRIZ; ROZADOS, 2015) (MARQUES; FREITAS, 2018b).

2.7. *Analytic Hierarchy Process – AHP*

O AHP (Analytic Hierarchy Process) é um método eficaz para a tomada de decisão, uma vez que permite identificar a melhor alternativa dentre as opções disponíveis e contribui para a definição de prioridades, levando em consideração aspectos tanto quantitativos quanto qualitativos (KINJO, 2021; SAATY, 2008). Ele simplifica a abordagem de decisões complexas ao desdobrá-las em comparações diretas entre as alternativas. A essência do método envolve a decomposição, avaliação comparativa e estabelecimento de prioridades, conforme ilustrado na Figura 2 (SAATY, 2003; SAATY; KATZ, 1990).

Uma das principais vantagens do método AHP é a sua capacidade de permitir que o usuário atribua pesos relativos a múltiplos critérios ou múltiplas alternativas em relação a um determinado critério de maneira intuitiva. Isso é feito enquanto se realiza uma comparação direta entre esses elementos. Com essa abordagem, mesmo quando duas variáveis são intrinsecamente incomparáveis, a experiência e o conhecimento das pessoas permitem reconhecer qual dos critérios é mais significativo (SAATY; KATZ, 1990).

Figura 2: Sequência das etapas na aplicação do método AHP



Fonte: Adaptado de Saaty, 1990

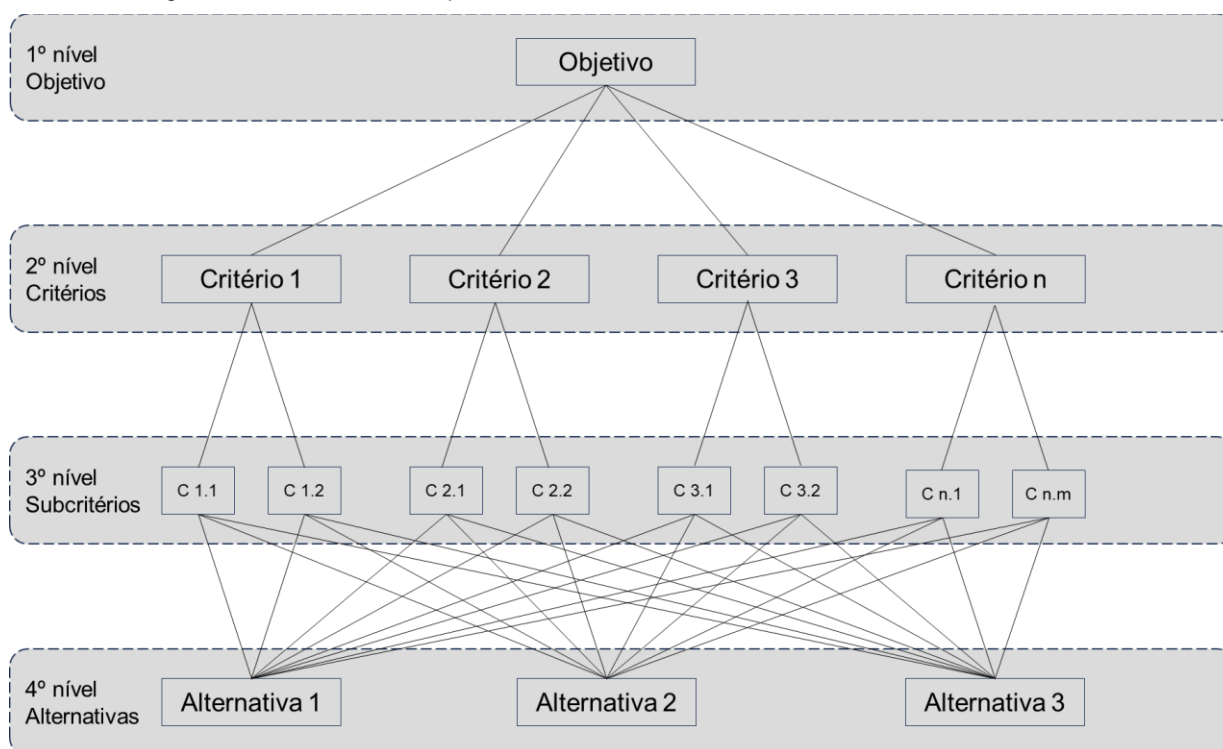
2.7.1. Etapas Método *Analytic Hierarchy Process* – AHP

Etapas de 1 a 5

Essas cinco etapas descrevem a estruturação do problema, delineando seus objetivos, atributos (critérios e subcritérios) e alternativas em forma de hierarquia, com a consideração da homogeneidade dos elementos em cada nível (SAATY, 2008; SAATY; KATZ, 1990).

A estrutura hierárquica é uma maneira simples de representar a dependência funcional entre os componentes em diferentes níveis de um sistema e, ao mesmo tempo, é um método conveniente para decompor problemas complexos. Isso possibilita retratar os relacionamentos entre os elementos agrupados em níveis, facilitando explicações de causa e efeito nas diversas etapas que constituem a cadeia, (CEZAR DE OLIVEIRA *et al.*, 2017) conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Estrutura Hierárquica do método AHP



Fonte: Adaptado de Saaty, 1991

A formação apresenta flexibilidade suficiente para criar um nível intermediário entre critérios e alternativas e incluir subcritérios (etapa 3), caso seja necessário, uma vez que, conforme destacado por SAATY e KATZ (1990), o cenário para a construção

das hierarquias deve ser detalhado da forma mais abrangente possível, mantendo, contudo, a caracterização dos elementos que a compõem (etapa 5).

A validação da estrutura hierárquica, ou seja, a confirmação de sua consistência, pode ser assegurada se os elementos do nível superior atuarem como atributos comuns para os elementos do nível imediatamente inferior (SAATY, 1994).

Etapas 6 a 8

As prioridades de um critério ou subcritério sobre outro, ou de uma alternativa sobre outra, são estabelecidas por meio de comparações par a par em razão de uma única propriedade por vez. O decisor, fundamentado na observação ou experiência, determina a importância relativa entre eles, sem preocupação com a influência de outras propriedades ou importância de outros elementos (SAATY, 2016).

Um método de auxílio à tomada de decisão multicritério deve legitimar a formulação dos julgamentos e convertê-los em números, produzindo assim uma resposta global pertencente a uma escala, que reflita quaisquer alterações impostas à decisão (SAATY; KATZ, 1990).

A escala fundamental do método AHP, representada na Tabela 3, permite a derivação de números absolutos em razão de prioridades. Consiste em uma ferramenta de informação e comunicação de significados que utiliza palavras para representar os conceitos envolvidos nas decisões. Dessa forma, é oferecido um equivalente semântico, denominado escala verbal, a cada índice de importância (SAATY, 2008) (SAATY, 1994).

Tabela 3: Tabela da Escala do método AHP

Escala numérica	Escala verbal	Definição
1	Igualmente importante	Duas alternativas contribuem igualmente para o objetivo
3	Moderadamente importante	Entre duas alternativas, por experiência e julgamento, uma se apresenta discretamente mais importante que a outra.
5	Significativamente importante	Entre duas alternativas, por experiência e julgamento, uma se apresenta significativamente mais importante que a outra.
7	Muito fortemente importante	Entre duas alternativas, a importância de uma é demonstrada mais expressivamente que a outra. A relação de dominância pode ser demonstrada na prática.
9	Extremamente importante	Entre duas alternativas, uma se apresenta absolutamente mais importante que a outra. Evidências conferem o mais alto grau de certeza.
2,4,6	Valores intermediários entre dois julgamentos	Quando é necessário ponderar a atribuição entre dois valores
Recíproca dos valores positivos	Na comparação entre duas alternativas, se a primeira recebe um dos valores acima quando comparada com uma outra, logo a segunda alternativa é atribuído o valor recíproco quando comparada com a primeira alternativa	Atribuição razoável.

Fonte: Adaptado de Saaty, 1990

A escala típica de Saaty varia de 1 a 9, com definições específicas para cada valor. Por exemplo, se o elemento *i* for "igualmente importante" ao elemento *j*, atribuímos o valor 1. Se *i* "um pouco mais importante que" *j*, atribuímos 3. A escala progride até 9, onde *i* é "extremamente mais importante que" *j*.

Essa tabela de comparação preenchida com valores ajuda a quantificar as preferências do tomador de decisão e fornece dados essenciais para o cálculo dos pesos relativos. Esses pesos são fundamentais para a construção de matrizes e para o processo geral de hierarquização e análise no AHP.

Etapas 9

O Consistency Random (RC) ou Razão de Consistência no AHP (Analytic Hierarchy Process) é uma medida que avalia a consistência das comparações feitas pelo decisor ao construir as matrizes de comparação. A consistência é importante porque, em um processo de tomada de decisão multicritério, é desejável que as comparações feitas pelo decisor sejam lógicas e coerentes.

No método AHP, o decisor faz comparações paritárias entre os elementos, atribuindo valores que representam as preferências ou importâncias relativas. O RC é calculado comparando a consistência da matriz de comparação do decisor com a consistência de uma matriz de comparação aleatória.

O Consistency Random (CR) é a proporção de consistência da matriz, quando comparada a um índice randômico (random index - IR), conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Índice randômico

<i>n</i> (Número de ordem da matriz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Saaty (2014, 1991b).

Embora seja aceitável que o índice de inconsistência de uma matriz possa chegar a até 20%, sugere-se que não ultrapasse 10% ($CR \leq 0,1$) para minimizar perturbações e preservar a robustez das respostas (F. UNIKASARI *et al.*, 2013; FUNO *et al.*, 2013). Dessa forma, tanto o número de alternativas a serem comparadas paritariamente quanto o número de ordem da matriz estariam limitados a no máximo dez (SAATY, 1994). Entretanto, se o valor do CR não estiver de acordo com os limites estabelecidos, SAATY, 2016) recomenda que o decisor reavalie seus julgamentos.

Etapa 10

As prioridades são derivadas pela normalização do vetor de prioridades, ou seja, pelo cálculo do autovetor direito (SAATY; HU, 1998), embora tenham sido propostos vários métodos alternativos, como o cálculo da média das colunas normalizadas, a média das linhas normalizadas, a média geométrica das linhas e outros (FABIANO; GOULART, 2010).

Conforme (SAATY; HU, 1998), a normalização está associada à comparação entre a escassez e a abundância dos critérios em cada alternativa, sendo esse contraste determinante para a classificação de prioridades. A presença abundante de um critério exerce influência mínima ou nula na determinação da importância das alternativas, enquanto um critério escasso desempenha um papel mais significativo no grau de predominância entre as alternativas, uma vez que uma quantidade maior dele estará presente na alternativa dominante.

Etapa 11

Após as etapas anteriores, as alternativas se distinguem por meio de valores, indicando que o valor mais elevado corresponde à alternativa com maior prioridade. A seguir, serão abordados os fundamentos algébricos que sustentam o método AHP.

2.7.2. Fundamentação Axiomática do Método *Analytic Hierarchy Process* – AHP

O método AHP emprega os princípios da álgebra linear para a modelagem de questões empíricas, fundamentado na inferência de que não apenas os problemas, mas também o conhecimento, os métodos utilizados e os objetivos pretendidos são relativos. Os quatro fundamentos axiomáticos propostos por SAATY (1986) a partir da escala de medição da composição hierárquica são descritos a seguir:

1º Axioma – Reciprocidade: Os elementos comparados aos pares pelo decisor devem ser reciprocamente correspondentes dentro da matriz, o que significa que se o elemento A é x vezes mais preferido que B , então o elemento B será x^{-1} vezes menos preferido que A (SAATY, 1986).

Um dos fundamentos algébricos da AHP envolve a ordem da matriz quadrada, caracterizada por ter o mesmo número de linhas e colunas, divididas pela diagonal principal (NOVAES *et al.*, 2008). A ordem de uma matriz A , é determinada pelos números de linhas m e colunas n . Em uma matriz quadrada A_{mn} , os valores de m e n são iguais, indicando que o número de linhas é equivalente ao número de colunas. Cada elemento a da matriz A é identificado pela sua posição nas coordenadas de linha i e coluna j , representadas na sequência a_{ij} , conforme apresentado na equação 1 (LIPSCHUTZ & LIPSON, 2011).

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Os elementos com índices iguais, como a_{11} , a_{22} e a_{33} , constituem a diagonal principal de uma matriz quadrada (LIPSCHUTZ e LIPSON, 2011). Pode-se afirmar que essa matriz é positiva quando todos os seus elementos são reais e positivos, ou seja, $a_{ij} > 0$ (BOLDRINI *et al.*, 1980). O AHP utiliza uma matriz considerada positiva e recíproca, na qual todos os elementos são positivos (SAATY, 1986). Além disso, os elementos posicionados à esquerda da diagonal principal são inversamente

proporcionais aos elementos à direita, conforme apresentado na equação 2.

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \text{ ou } a_{ij} \cdot a_{ji} = 1, a_{ij} > 0 \quad (2)$$

Dessa forma destaca-se a possibilidade de empregar um número reduzido de julgamentos para alcançar resultados mais precisos (CRISTINA *et al.*, 2016a). Uma vez que as condições acima (2) são atendidas, o número de comparações entre os elementos para uma matriz de ordem A_{mn} corresponde ao apresentado na equação 3.

$$A_{mn} = \frac{n(n-1)}{2} \quad (3)$$

A comparação paritária das alternativas, para todo i, j , conforme SAATY (1986), é estabelecida ao questionar a importância do elemento a_i em relação ao elemento a_j . Se $a_i = a_j$, então $a_{ij} = 1$. No entanto, se $a_i \neq a_j$, indicando que a_i é mais importante que a_j , é necessário determinar qual elemento da escala fundamental entre 2 e 9 representa essa diferença de importância.

Por outro lado, se $a_i \neq a_j$, indicando que a_i é menos importante que a_j , é preciso determinar o inverso de qual elemento da escala fundamental, variando de -2 a -9, representa essa relação.

A Figura 4 representa graficamente os postulados discutidos anteriormente, destacando: I) a igualdade no número de linhas e coluna (SAATY; KATZ, 1990); II) a disposição das alternativas nos rótulos das linhas i e colunas j ; III) a comparação paritária entre as alternativas, simbolizadas pelos elementos x, y ou z da escala fundamental (SAATY, 1986); IV) a equivalência das alternativas quando comparadas a si mesmas, formando a diagonal principal (SAATY, 1986); V) o número de comparações paritárias necessárias, representadas por setas com diferentes traçados e, VI) a condição de reciprocidade dos elementos à esquerda da diagonal principal em relação aos elementos à direita da diagonal principal (SAATY, 1986).

Figura 4: Matriz de Comparações Paritárias do método AHP

	A	B	C	D	
A	1	x	y	$\frac{1}{z}$	COMPARAÇÕES
B	$\frac{1}{x}$	1	$\frac{1}{x}$	x	
C	$\frac{1}{y}$	x	1	z	
D	z	$\frac{1}{x}$	$\frac{1}{z}$	1	
VALORES RECÍPROCOS					

Fonte: Próprio Autor

Uma razão, representada pelo quociente a/b de duas quantidades da mesma categoria e proporcionalidade, reflete a igualdade entre duas razões, a/c e b/d . Em relação à escala de razão, ela equivale a um conjunto de números que permanecem inalterados quando multiplicados por uma constante positiva, mesmo que a e b pertençam a categorias diferentes de c e d . Dessa forma, a razão de peso dos objetos de cada categoria se mantém igual ao ser lida em ambas as escalas (BOLDRINI *et al.*, 1980; SAATY, 1986). Por outro lado, uma escala de razão normalizada consiste na leitura padronizada de uma série de objetos de diversas categorias (SAATY; KATZ, 1990).

Como mencionado anteriormente, as escalas de razão, proporcionalidade e escalas de razão normalizadas representam um dos fundamentos teóricos do método AHP. Devido à capacidade de serem somadas e multiplicadas quando pertencem a uma escala comum, como no caso de uma escala de prioridade, essas escalas possibilitam a generalização de uma teoria de decisão para situações de dependência e feedback (SANTOS; SIQUEIRA, 2017).

Ao avaliar a supremacia de uma alternativa sobre outra, Saaty (2008) sugeriu a utilização de um índice da escala fundamental que representasse a razão de w_i/w_j . Por meio de um número absoluto que se aproximasse ao máximo desse quociente, busca-se obter o autovetor de prioridades, ou seja, a predominância de cada elemento em relação aos demais em relação a um critério específico, expressa em valores entre 0 e 1 (BOLDRINI *et al.*, 1980).

Nos casos em que o elemento não está submetido a um critério, terá um

autovetor igual a zero, de modo que não será considerado nas comparações (SAATY, 1986). No método AHP, a escala de razão relativa é derivada da matriz recíproca de comparações em pares e é resultante do sistema de equações descritas em (4) e (5).

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j = \lambda_{max} w_i \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (5)$$

Para uma compreensão mais aprofundada, é necessário retomar o significado dos símbolos w e λ_{max} , que representam, respectivamente, o autovetor e o autovalor. A equação descrita em (2) constitui um subsistema das equações (4) e (5). A solução denominada autovetor direito principal, é normalizada, conforme exemplificado em (6) (SAATY, 1986; SAATY; HU, 1998; SAATY; KATZ, 1990).

$$A = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Considerando que w não é previamente conhecido durante a elaboração da matriz A e esta revela inconsistências nos julgamentos inerentes à tomada de decisão pelos indivíduos, torna-se imprescindível estabelecer um parâmetro aceitável de inconsistência para o método (SAATY, 1986, 1994; SAATY; HU, 1998).

Processos do tipo multicritério, como o AHP, que geram vetores prioritários, envolvem dois tipos de transitividade: 1) transitividade ordinal, que estabelece que se o elemento A é preferido a B , e B é preferido a C , então A é preferido a C ; e 2) transitividade cardinal, na qual se A é três vezes mais preferido que B , e B é duas vezes mais preferido que C , então A é seis vezes mais preferido que C . A equivalência

dessas premissas para a consistência da matriz em linguagem algébrica é delineada em (7) (SAATY, 2003).

$$a_{ij}a_{jk} = a_{ik} \quad \text{para } i, j \text{ e } k = 1, 2, \dots, n$$

$$a_{ij} = \frac{a_{jk}}{a_{ik}} = a_{ij}^{-1} \quad \text{para } a_{ij} = \frac{a_{ik}}{a_{jk}} \quad (7)$$

Após construir as matrizes de julgamento, a obtenção da dominância total das alternativas a serem comparadas é realizada por meio da normalização dos dados. Essa normalização consiste em distribuir a prioridade do critério de acordo com a dominância relativa de cada alternativa. Em outras palavras, transforma-se uma medição absoluta em relativa (SAATY; KATZ, 1990)

Nas medições absolutas, o valor é diretamente proporcional à necessidade, sendo mais bem satisfeita quanto maior o valor. No entanto, nas medições relativas, a proporcionalidade pode ser direta ou inversa, não implicando necessariamente que um maior valor satisfaça a necessidade em maior grau. Em algumas situações, a abundância pode levar ao declínio da satisfação da necessidade após a saciedade (SAATY, 1994).

A normalização refere-se ao conceito de escassez e abundância em relação à presença dos critérios em cada alternativa. Esse contraste determina a classificação de prioridade, em que um critério abundante exerce pouca ou nenhuma influência na determinação da importância das alternativas, enquanto um critério escasso é mais influente devido à sua maior presença na alternativa dominante (SAATY, 2003, 2008).

Diversos métodos foram propostos para a normalização do vetor de prioridades, incluindo o cálculo da média das colunas normalizadas, a média das linhas normalizadas, e a média geométrica das linhas, entre outros (Gomes et al., 2009). Segundo alguns autores (FABIANO; GOULART, 2010; GÜLGEN, 2014; SAATY, 2003, 2016), o cálculo do autovetor direito da matriz é o mais indicado para obter o vetor de prioridades em matrizes inconsistentes, conforme representado matematicamente em (8).

$$\hat{w}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n i} \quad (8)$$

Se a condição acima não for atendida, a matriz é recíproca, mas não é consistente. Portanto, para a formulação geral do autovalor expresso em (5), é necessário multiplicar a matriz A pela transposição do vetor de pesos $w = w_1, w_2, \dots, w_n$, a fim de obter o resultado $\lambda_{max} w$ (OLIVEIRA, et al., 2014), como ilustrado em (9).

$$A_1 \quad \dots \quad A_n$$

$$Aw = \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_N \end{matrix} \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \dots & \ddots & \dots \\ \frac{w_n}{w_1} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = nw \quad (9)$$

ou

$$A \cdot w = n \cdot w$$

A regeneração da escala de razões ocorre pela solução do problema $A \cdot w = n \cdot w$. Calcular o autovetor estimando o vetor de prioridades ou vetor x da matriz. Esse vetor deve ser um múltiplo positivo do autovetor principal da matriz A , sendo c o autovalor máximo de A que atende à relação expressa em (10) (SAATY, 2003).

$$Ax = cx, c > 0 \quad (10)$$

Esse ponto teórico específico da AHP, apesar de críticas recebidas, também gerou sugestões alternativas para o cálculo de prioridades, como o método dos mínimos quadrados e o método da média geométrica logarítmica (BARZILAI; GOLANY, 1994). No entanto tais métodos são recomendados apenas para matrizes consistentes, enquanto o método de cálculo do autovetor direito principal se aplica a matrizes tanto consistentes quanto inconsistentes.

A representação $Ax = cx$ sugere uma relação próxima da consistência entre as matrizes. Contudo, uma matriz $A = (a_{ij})$ é uma pequena perturbação multiplicativa

de uma matriz consistente $w = \left[\frac{w_i}{w_j} \right]$ e possui um autovetor x , que é uma pequena perturbação do autovetor w da matriz consistente (SAATY; HU, 1998).

A relação $Ax = cx$ é frequentemente expressa na literatura como $A \cdot w = \lambda_{max} \cdot w$, onde $w = w_1, w_2, \dots, w_n$ é o autovetor principal de A e λ_{max} é o autovalor máximo correspondente. O método proposto para a solução desse problema é denominado autovetor principal direito (SAATY, 1986, 2003).

Essa relação obedece ao produto de Hadamard, que determina $A = W \cdot E$, em que a perturbação $E = (\varepsilon_{ij})$, $\varepsilon_{ij} = \varepsilon - 1$, influencia cada elemento da matriz por meio da multiplicação $a_{ij} \cdot \varepsilon_{ij}$, $\varepsilon_{ij} = \varepsilon - 1$. No entanto, essa proposição pode ser reformulada como uma perturbação aditiva da matriz de consistência, como apresentado a seguir (11).

$$\begin{aligned} \frac{w_i}{w_j} + \gamma_{ij} &= \frac{w_1}{w_j} \cdot \varepsilon_{ij}, \quad \varepsilon_{ij} = 1 + \frac{w_j}{w_i} \cdot \gamma_{ij}, \\ \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{-1} &= \frac{w_j}{w_i} \cdot \gamma_{ij} = \frac{1}{1 + \frac{w_j}{w_i} \cdot \gamma_{ij}} \end{aligned} \quad (11)$$

Quando uma matriz exibe uma perturbação moderada e se aproxima ao máximo da consistência, a soma de todas as ε_{ij} de uma linha específica será equivalente ao valor de λ_{max} (BARZILAI; GOLANY, 1994; SAATY, 2016). Isso, no sistema algébrico, corresponde à equação apresentada em (12).

$$\sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij} = \lambda_{max}, \varepsilon \geq 1 \quad (12)$$

A condição para $\lambda_{max} \geq n$, indicando que λ_{max} deve ser igual à ordem da matriz ou ao número de alternativas, pressupõe que a matriz seja consistente, e que todos os ε_{ij} sejam iguais a 1. Nesse contexto, qualquer desvio de λ_{max} em relação

a n resultará na razão de inconsistência dos julgamentos (BARZILAI; GOLANY, 1994).

A inconsistência das matrizes está associada aos julgamentos que precisam ser ajustados caso ultrapassem o valor maior que 0,10 da razão de consistência $RC \leq 0,10$ (SAATY, 1986; SAATY; KATZ, 1990). Quanto menor o desvio de λ_{max} em relação a n , maior será a consistência da matriz de comparações. Assim, busca-se que λ_{max} seja igual a n , e o cálculo do desvio é determinado pela relação entre $(\lambda_{max} - n)$ e os graus de liberdade da matriz $(n - 1)$, na formulação do índice de consistência (Consistency Index – IC), como ilustrado na equação (13) (SAATY, 2008; SAATY; KATZ, 1990).

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (13)$$

O IC serve como ponto inicial para avaliar a proporção de consistência da matriz por meio da comparação com um índice randômico (Random Index – IR). Este índice é derivado de uma amostra de 500 matrizes recíprocas com escalas variando de 1/9 a 1/8, ..., 1, ..., 8, 9, conforme apresentado na Equação (14).

$$CR = \frac{IC}{IR} \quad (14)$$

Os índices randômicos utilizados para calcular a consistência da matriz foram explicados anteriormente, na Etapa 9 do item 2.7.1.

A taxa mínima de inconsistência, CR , corresponde aos novos conhecimentos que, uma vez incorporados à experiência do decisor, têm o potencial de modificar a ordem de preferência das alternativas e estimular a criação de novos modelos de solução. Por outro lado, destaca-se a importância de o decisor reavaliar seus julgamentos caso o CR não atenda aos limites preestabelecidos.

Dentro da estrutura hierárquica do método AHP, todos os critérios são designados ao nível i , enquanto as alternativas de decisão são agrupadas no nível $i + 1$. Isso resulta na geração de uma matriz para cada alternativa de $i + 1$ em relação aos critérios de i , conforme proposto por Saaty (1986, 2014). A decisão final é derivada do maior valor resultante da multiplicação das matrizes de prioridade dos níveis $i + 1$ e i , onde p_i e P_{i+1} representam, respectivamente, as matrizes de

prioridade desses níveis. Isso determina o vetor de prioridades compostas $[pc]$, como ilustrado na equação a seguir (15).

$$pc = P_{i+1} + p_i \quad (15)$$

2º Axioma – Homogeneidade: Apenas os elementos que pertencem a um mesmo conjunto ou compartilham características similares são passíveis de comparação, uma vez que os erros de julgamento estão diretamente relacionados ao grau de disparidade entre os elementos (SAATY, 1986).

Dentro de um determinado nível, os elementos presentes devem possuir um grau uniforme de importância (SAATY, 2016). A condição de similaridade deve ser aplicada a um conjunto específico de alternativas em relação a um determinado critério, de forma que as preferências possam ser expressas por meio de uma escala restrita, como exemplificado a seguir (16).

$$x \in L_k, x^- \subseteq L_{k+1} \quad (16)$$

3º Axioma – Independência: Ao comparar paritariamente os elementos de um determinado nível da hierarquia, é necessário que esses elementos sejam mutuamente excludentes entre si. Além disso, o peso de cada critério deve ser atribuído independentemente das alternativas (SAATY, 1986; SAATY; KATZ, 1990).

Em termos matemáticos, uma hierarquia H compreende os níveis $L_1, L_2, \dots, L_h, L_h$, para cada L_k , em que $k = 1, 2, \dots, h - 1$. Isso equivale a afirmar que:

- a) L_{k+1} é externamente dependente de L_k ;
- b) L_{k+1} é internamente independente em relação a todos os elementos $a \in L_k$;
- c) L_k não é externamente dependente de L_{k+1} .

4º Axioma – Expectativa: Para fins de tomada de decisão, a hierarquia é considerada completa. As crenças individuais de cada pessoa são fundamentadas em razões pessoais, tornando essencial que todas as alternativas, critérios e expectativas, tanto explícitas quanto implícitas, estejam representadas na hierarquia (SAATY; HU, 1998)

O processo de análise hierárquica não está rigidamente vinculado à racionalidade, uma vez que as pessoas possuem muitas expectativas irracionais.

Estas expectativas podem ser incorporadas ao processo decisório por meio de uma função de ponderação baseada nos conceitos do Axioma 3.

Em outras palavras, os critérios C estão integrados na hierarquia H , composta pelos níveis L_h , os quais, por sua vez, são formados pelos elementos a (SAATY, 1986), conforme exemplificado em (17).

$$C \subset H - L_h, a = L_h \quad (17)$$

2.7.3. Decisões tomadas por um grupo de especialistas

As decisões em grupo resultam da combinação de preferências individuais, acordadas para formar um propósito claro e explícito. Em relação aos vários aspectos da tomada de decisões em grupo, existe uma série de desafios comuns nas etapas de formação do grupo, condução das sessões e implementação das ações (NOVAES *et al.*, 2008).

Esses desafios incluem o diferencial de poder entre os membros, a falta de autonomia do grupo na implementação das ações, a falta de adesão de sujeitos estratégicos para as decisões, manipulação de preferências entre os membros e tecnicismo, entre outros (SILVA *et al.*, 2020).

As medidas propostas por Saaty (1990) para lidar com esses desafios incluem a atribuição de pesos à importância de cada participante, a formação de grupos com a maior diversificação e número de integrantes possível, a definição de regras para a condução das sessões e a designação de um mediador ou juiz.

Num contexto em que todos os participantes convergem para o mesmo objetivo, há vários métodos documentados na literatura para a operacionalização das decisões em grupo. De maneira geral, a obtenção da síntese de prioridades varia em função do comportamento do grupo. Para grupos sinérgicos que atuam como uma unidade, sugere-se a Agregação Individual de Julgamentos [AIJ], obtida por meio de consenso, votação ou compromisso.

Já para grupos com menor grau de entrosamento entre os membros, ou nos quais os decisores apresentem objetivos divergentes, ou ainda nos casos em que se prefira manter a análise individual dos decisores, recomenda-se a Agregação Individual de Prioridades (AIP), obtida por meio da média geométrica (KINJO *et al.*,

2021)

Independentemente da ordem em que os julgamentos são processados, o cálculo da média geométrica satisfaz a propriedade recíproca, razão pela qual se apresenta mais adequado à obtenção de prioridades consensuais que outras estimativas. Por meio da média geométrica de um grupo s em que cada integrante é representado por k , sendo $k = 1, 2, \dots, s$, obtém-se para a matriz o valor final da equação a seguir (18):

$$w.C_i = \sqrt[s]{\prod_{k=1}^s w.C_{ik}} \quad (18)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

Dado que m corresponde ao número de critérios, a função aditiva a seguir é apresentada, onde n representa o número de alternativas, conforme segue (19).

$$f.A_j = \sum_{i=1}^m w_f.C_i(w_i.A_j) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

2.8. Lógica FUZZY

A lógica *FUZZY* ou Teoria dos Conjuntos Fuzzy, também conhecida como lógica difusa, é uma extensão da lógica clássica que foi desenvolvida para lidar com a incerteza e a imprecisão nas informações. Ela foi proposta por Lotfi Zadeh, um matemático e engenheiro elétrico americano, na década de 1960 (ZADEH, 1965).

A lógica clássica, que é a base da matemática e da lógica convencionais, lida com proposições que são verdadeiras (valor 1) ou falsas (valor 0). No entanto, na vida real, muitos fenômenos e conceitos não podem ser facilmente classificados como estritamente verdadeiros ou falsos. Eles podem estar em um estado intermediário ou possuir graus de pertinência. É nesse contexto que a lógica *FUZZY* se torna relevante (SANTOS *et al.*, 2017).

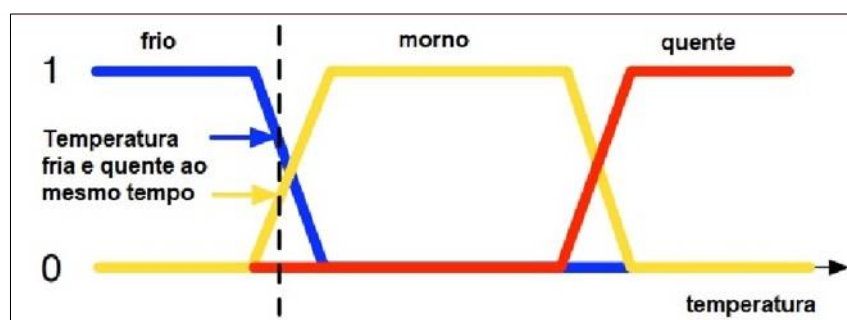
A lógica *FUZZY* permite que variáveis linguísticas sejam tratadas de forma mais natural, associando-as a conjuntos *FUZZY*, nos quais os elementos têm graus de

pertinência que variam de 0 a 1. Essa abordagem torna possível lidar com conceitos vagos, imprecisos e ambíguos.

Existem diversas aplicações em uma variedade de campos, como controle de sistemas, inteligência artificial, tomada de decisão, reconhecimento de padrões e engenharia. Sistemas baseados nessa lógica são especialmente úteis em situações em que as informações disponíveis são limitadas ou imprecisas (FELISONI *et al.*, 2021).

Em um exemplo utilizando os conceitos de "frio", "morno" ou "quente", a tendência é que sejam modelados matematicamente como dimensões mutuamente excludentes (ou é frio, ou morno ou quente). No entanto, sob a lógica difusa, o limite entre um e outro conjunto não é claro, uma vez que cada conceito possui diferentes graus de pertinência ("pertencimento") a mais de um conjunto (ROMEY *et al.*, 1997). As dimensões "frio", "morno" e "quente" podem ser modeladas na Figura 5.

Figura 5: Exemplo de aplicação Lógica FUZZY



Fonte: Próprio autor

Neste caso, a temperatura não se enquadra simplesmente como fria ou quente, mas recebe uma classificação não exata ou difusa, como um pouco frio ou um pouco quente. A combinação da Análise de Decisão Multi-Critério (*Multi-Criteria Decision Analysis* – MCDA) com a lógica Fuzzy surge como uma possibilidade para aprimorar a precisão da análise. Dentre os métodos MCDA, o Processo Hierárquico Analítico (AHP) proporciona um mecanismo simples, porém robusto, para compreender as relações proporcionais entre os pesos dos componentes em um problema complexo (JUNIOR *et al.*, 2021) (SAATY, 2016).

2.9. FUZZY Analytic Hierarchy Process - FAHP

O AHP é amplamente empregado em situações de tomada de decisões complexas. Entretanto, em cenários com níveis crescentes de complexidade, a

percepção humana desempenha um papel relevante. Nessas situações, imprecisões e ambiguidades são comuns. A presença dessas imprecisões e ambiguidades enfraquece a eficácia do AHP, o que abre espaço para a aplicação da lógica Fuzzy (YANG *et al.*, 2011).

O método Fuzzy AHP surgiu com a proposta inicial de elaborar uma abordagem difusa para a tomada de decisões, o Fuzzy AHP é uma metodologia que se baseia em julgamentos comparativos difusos, os quais são expressos por meio de números difusos triangulares (CHANG, 1996).

A teoria dos conjuntos Fuzzy para abordar a incerteza relacionada à imprecisão, em semelhança ao pensamento humano. Dessa maneira, o AHP foi expandido para incluir uma extensão Fuzzy, sendo elaborado para lidar com problemas de hierarquia imprecisa (CHANG, 1996; ZADEH, 1965)

Nesse contexto, após a comparação par a par dos critérios e subcritérios por meio dos valores definidos pelo método AHP original, foi estabelecida uma escala com números Fuzzy para a conversão. Esse processo geralmente é descrito como “fuzzificação”, é realizado utilizando a escala triangular Fuzzy, conforme apresentado na Tabela 5 (FELISONI *et al.*, 2022).

No processo os valores da escala de Saaty que são 1, 3, 5, 7 e 9 são a referência da triangularização, para serem transformados em números triangulares é subtraído o valor “1”, $n-1$ em relação ao valor de referência e somado o valor “1”, $n+1$ em relação ao mesmo valor (JUNIOR *et al.*, 2021; SANTOS; SIQUEIRA, 2017; WAGNER PIETROBELLI BUENO *et al.*, 2019).

Tabela 5: Tabela de “fuzzificação”: números da escala de Saaty e respectivos números triangulares FUZZY

Escala Saaty*	Descrição verbal	Números triangulares fuzzy
1	Igualmente importante	(1, 1, 2)
3	Fracamente importante	(2, 3, 4)
5	Consideravelmente importante	(4, 5, 6)
7	Fortemente importante	(6, 7, 8)
9	Absolutamente importante	(8, 9, 9)

* Os números 2, 4, 6 e 8 são usados quando os indivíduos têm percepções intermitentes, seus intervalos triangulares são $n-1$ e $n+1$, assim como os números de Saaty acima.

Fonte: Felisoni (2022)

Por exemplo, quando um tomador de decisão expressa que o Critério A é consideravelmente mais importante que o Critério B (A consideravelmente > B), essa preferência é representada internamente por meio de números Fuzzy triangulares (4, 5, 6). Em comparação, se a preferência fosse inversa (A consideravelmente < B), ela seria traduzida como (1/6, 1/5, 1/4) na matriz de contribuição (GUARINO *et al.*, 2012) (ARAÚJO *et al.*, 2022).

Existem diversas opções de escalas, tais como triangular, trapezoidal, gaussiana, entre outras. A triangular é a mais comum, como ilustrado na Figura 6, devido à sua simplicidade computacional, que simplifica o processamento de dados. Um número Fuzzy triangular pode ser representado da seguinte maneira: (l, m, u).

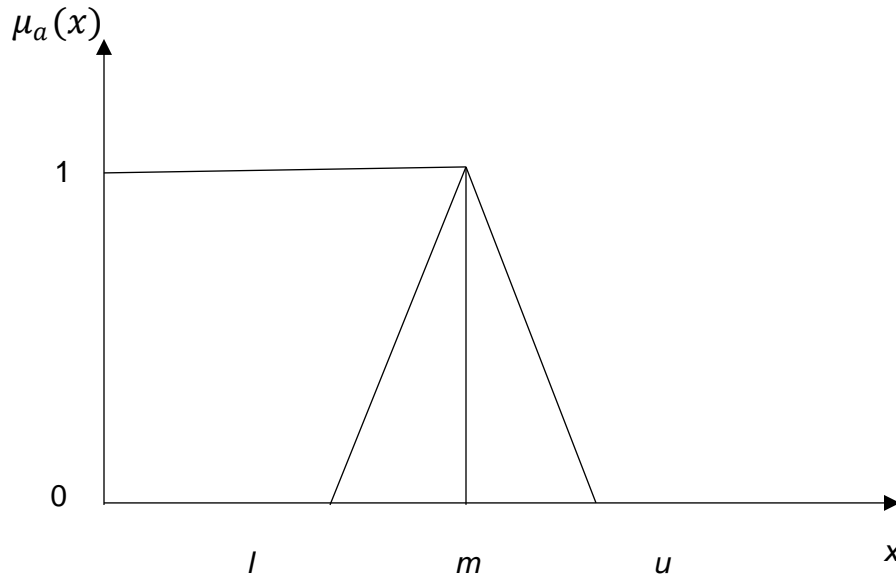
Onde:

l = limite inferior;

m = valor modal (valor de pertinência = 1);

u = limite superior.

Figura 6: Número FUZZY Triangular



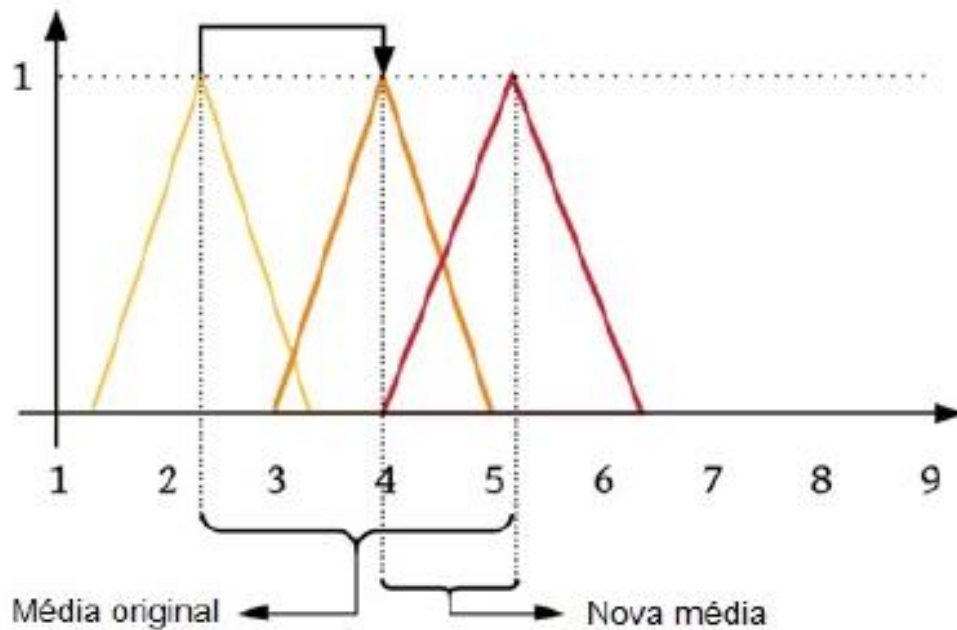
Fonte: Próprio autor

Procedimentos FUZZY AHP

Até a utilização da tabela de fuzzificação os procedimentos do FUZZY AHP são idênticos aos procedimentos AHP, eles se diferenciam a partir desse ponto. Os valores coletados no método AHP são ponderados utilizando o modelo triangular para

a comparação dos dados, Figura 7.

Figura 7: Fuzzificação dos números escala de Saaty



Fonte: Adaptado Felisoni (2022)

Após a ponderação os valores Fuzzy referentes ao AHP são utilizados na tabela de comparações pareadas.

2.9.1. Definições sobre a fuzzificação e a triangularização no método FAHP

A fuzzificação é uma etapa crucial em sistemas de lógica fuzzy, onde se convertem valores precisos em conceitos fuzzy para melhor lidar com a incerteza e imprecisão inerentes a muitos ambientes e situações do mundo real. Ela permite a representação de informações vagas e subjetivas, utilizando funções de pertinência para mapear valores precisos em graus de pertinência a conjuntos fuzzy (GUL *et al.*, 2019).

A transformação é realizada por meio de funções de pertinência associadas a conjuntos fuzzy específicos. Suponha que tenhamos um valor preciso x e um conjunto fuzzy A com uma função de pertinência $\mu_A(x)$. A fuzzificação desse valor em relação ao conjunto A é obtida atribuindo a x um grau de pertinência $\mu_A(x)$ a A . Isso significa que x pertence a A em um grau específico representado pela função de pertinência (YANG *et al.*, 2011).

A fórmula geral de fuzzificação é expressa por Fuzzy Value = Fuzzy Value $A(x)$ = $\mu_A(x)$, onde Fuzzy Value $A(x)$ é a representação fuzzy do valor x em relação ao conjunto A . Essa representação é fundamental para operações subsequentes em sistemas fuzzy, como inferência e tomada de decisão, onde a incerteza e a imprecisão são levadas em consideração.

A fuzzificação refere-se à atribuição de graus de pertinência a um elemento em relação a conjuntos fuzzy, enquanto a triangularização é uma abordagem específica para representar funções de pertinência em conjuntos fuzzy.

Na triangularização, a função de pertinência de um conjunto fuzzy é modelada usando uma função triangular. Uma função triangular tem a forma de um triângulo no espaço fuzzy, onde o valor máximo (1) é atribuído a um ponto central e diminui linearmente em ambas as direções. Essa representação simplificada é frequentemente utilizada para modelar a incerteza e a imprecisão em sistemas baseados em lógica fuzzy (AYYILDIZ; TASKIN GUMUS, 2021).

Assim, enquanto a fuzzificação envolve atribuir graus de pertinência a elementos em relação a conjuntos fuzzy, a triangularização é uma técnica específica para modelar as funções de pertinência desses conjuntos usando formas triangulares. Ambos os conceitos contribuem para a representação eficaz de incerteza e imprecisão em sistemas baseados em lógica fuzzy.

2.9.2. Fundamentação Axiomática do Método Fuzzy *Analytic Hierarchy Process* – FAHP

Na teoria dos conjuntos fuzzy, a fuzzificação é guiada por alguns axiomas para garantir uma representação coerente e consistente. Os axiomas associados à fuzzificação incluem:

1. Axioma da Identidade (ID):

- $\mu_A(x)$ é sempre igual a 1 quando x pertence exatamente ao conjunto A , e $\mu_A(x)$ é igual a 0 quando x não pertence a A .

2. Axioma da Normalização (N):

- A soma total dos graus de pertinência de um valor x a todos os conjuntos fuzzy possíveis é igual a 1.
- Matematicamente, $\sum \mu_i(x) = 1$, onde $\mu_i(x)$ é o grau de pertinência

de x ao conjunto fuzzy i .

3. **Axioma da Monotonicidade (M):**

- Se x pertence mais fortemente a A do que a B , então $\mu_A(x)$ deve ser maior que $\mu_B(x)$.

Esses axiomas são fundamentais para garantir que a fuzzificação preserve as propriedades lógicas e matemáticas necessárias para uma representação eficaz de valores em lógica fuzzy. Cada axioma contribui para a consistência e interpretação do processo de fuzzificação em contextos variados (GUARINO *et al.*, 2012).

3. TRABALHOS CORRELATOS

Esse capítulo oferece uma revisão da literatura abordando os fatores de risco no transporte rodoviário de produtos explosivos, as metodologias adotadas e a aplicação do método FAHP. Seu propósito é fornecer elementos teóricos para examinar o estado atual do conhecimento e contribuir para a identificação de lacunas na pesquisa.

3.1. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A revisão sistemática da literatura é uma modalidade de pesquisa que segue protocolos específicos e tem como objetivo contextualizar o problema dentro dos estudos científicos já existentes e analisar as possibilidades de pesquisa e reflexão na literatura consultada.

Os procedimentos empregados neste estudo de revisão sistemática são fundamentados no modelo PRISMA para revisões sistemáticas e meta-análises. O modelo PRISMA consiste em um conjunto de elementos baseados em evidências, fornecendo as diretrizes necessárias para uma revisão sistemática sólida e que atenda aos requisitos do tema abordado (MOHER *et al.*, 2009).

Para a elaboração da revisão sistemática da literatura foram consultadas seis bases de dados: Science Direct, Proquest, SciELO, Scopus, IEEEExplore e Google Acadêmico.

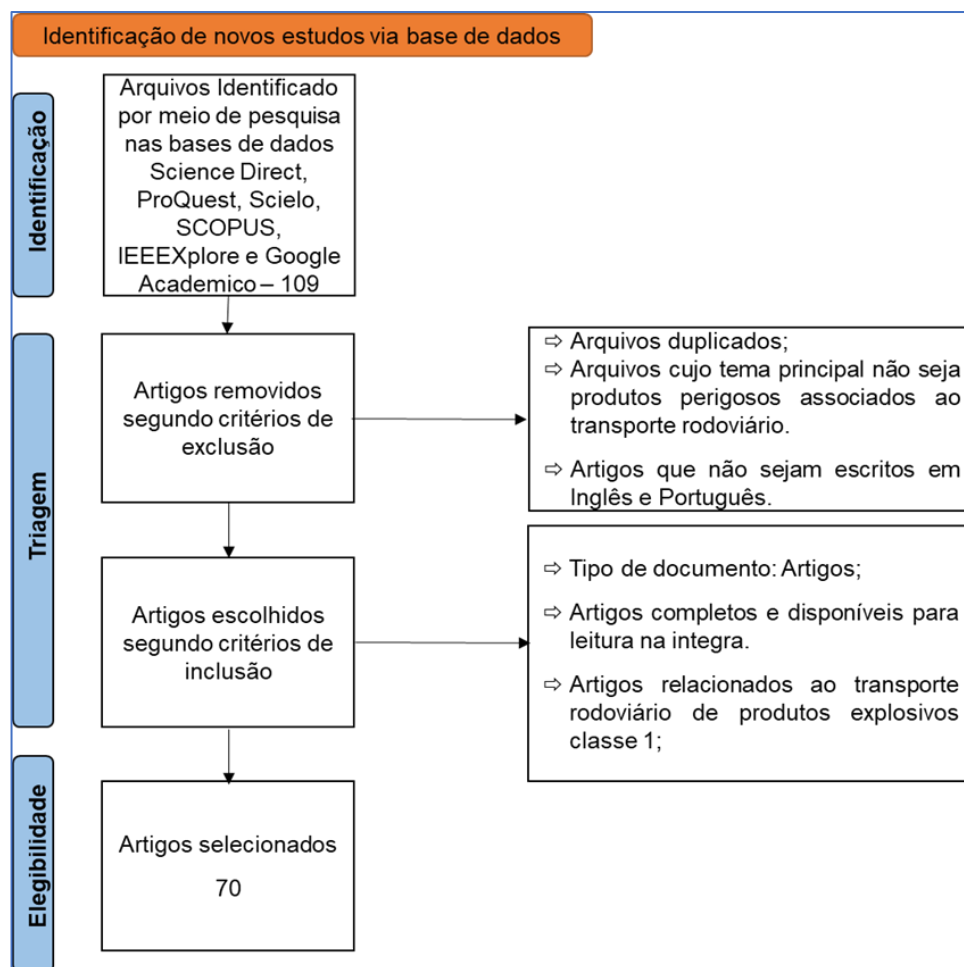
Para iniciara revisão sistemática, são definidos os conjuntos de palavras-chave relacionados ao tema de pesquisa. Os dez conjuntos de palavras chaves utilizados nas bases pesquisa, foram:

- I. “Road transport” and “Dangerous products” and “Explosives”
- II. “Road transport” and “Dangerous products” and “Analytic Hierarchy Process”
- III. “Road transport” and “Dangerous products” and “FUZZY”
- IV. “Road transport” and “Explosives” and “Analytic Hierarchy Process”
- V. “Road transport” and “Explosives” and “FUZZY”
- VI. “Road transport” and “Analytic Hierarchy Process” and “FUZZY”
- VII. “Dangerous products” and “Explosives” and “Analytic Hierarchy Process”
- VIII. “Dangerous products” and “Explosives” and “FUZZY”

- IX. “Dangerous products” and “Analytic Hierarchy Process” and “FUZZY”
 X. “Explosives” and “Analytic Hierarchy Process” and “FUZZY”

A condução da revisão sistemática da literatura, utilizando dez conjuntos de palavras-chave, levou à identificação de 109 artigos. Dentre esse total, 10 eram duplicados e 29 foram excluídos por não se enquadrarem no escopo da pesquisa. Consequentemente, foram selecionados 70 artigos para compor a revisão sistemática abordando o tema de estudo, conforme demonstrado na figura 8.

Figura 8: Fluxograma de Informações com as fases da revisão sistemática



Fonte: Adaptado de PRISMA diagrama de fluxo (MOHER e. al. 2009)

Dentre os artigos selecionados trinta e três descrevem o transporte de produtos perigosos via modal rodoviário, conforme a tabela 6, esses artigos utilizam as seguintes técnicas de pesquisa: Análise Estatística, Modelagem Matemática, Estudo de Caso, Modelagem e Simulação utilizando redes Bayesianas, Revisão da Literatura, Modelagem e Simulação de Monto Carlo.

Tabela 6: Artigos sobre Produtos Perigosos Transportados via Modal Rodoviário

ARTIGO	SÍNTESE
Truck Driver Scheduling Problem: Literature Review	Esse artigo faz uma revisão da literatura sobre as dificuldades em organizar o agendamento no transporte de produtos perigosos.
A regional model of road accessibility in Mexico: Accessibility surfaces and robustness analysis	
Proposal of a model for the planning of information systems for use in environments of high organizational turbulence - the case of road transportation of dangerous products	O artigo demonstra a modelagem matemática no transporte rodoviário de produtos perigosos (TRPP), aborda as principais variáveis no processo de transporte de produtos perigosos
Quantitative Assessment of Safety and Health Risks in HAZMAT Road Transport Using a Hybrid Approach: A Case Study in Tehran	Estudo de caso com avaliação quantitativa de riscos de segurança e saúde no Transporte Rodoviário de produtos perigosos em Teerã
Hazardous materials truck transportation problems: A classification and state of the art literature review	
Enhancement of monitoring systems for the transport of dangerous goods by road	
Modelling as a Tool for the Planning of the Transport System Performance in the Conditions of a Raw Material Mining	Modelagem e simulação do processo de transporte do minério, foi utilizada a ferramenta "ExtendSim 8"
Causation Analysis of Hazardous Material Road Transportation Accidents by Bayesian Network Using Genie	O artigo descreve uma pesquisa de análise dos fatores de risco no transporte de produtos perigosos fazendo com que sua segurança evolua do tipo "passivo" para ao tipo "ativo"
Study on Features of Hazardous Goods Transport Accidents on Highway	O artigo trata de uma revisão bibliométrica sobre acidentes com produtos químicos, líquidos inflamáveis e gases inflamáveis
Exploring risk factors contributing to the severity of hazardous material transportation accidents in China	O artigo utilizou o modelo probit/logit
A comprehensive modeling framework for hazmat network design, hazmat response team location, and equity of risk	Pesquisa descritiva com proposta de modelo baseada na multiplicação da probabilidade de acidente pelas consequências estimadas, além da função do tempo de resposta para o incidente
Informations about road transport of dangerous substances in the State of São Paulo: challenges for environmental health surveillance	
Risk analysis for road and rail transport of hazardous materials: A GIS approach	
Diagnosis on Transport Risk Based on a Combined Assessment of Road Accidents and Watershed Vulnerability to Spills of Hazardous Substances	
HEALTH AND WORKING CONDITIONS OF TRUCK DRIVERS IN BRAZIL	O artigo trata da saúde de motoristas, relaciona com o transporte de produtos perigosos
Improving security in road transportation of hazardous materials	
Essential Safety Factors for the Transport of Dangerous Goods by Road: A Case Study of Lithuania	
Risk occurrence measures for dangerous goods goods transport on a road network	
An Agent-based framework for mitigating hazardous materials transport risk	
Risk Evaluation and Risk Control in Road	

Overbuilding

Transport Routes for Dangerous Goods

Decision support systems for assessing risks involved in transporting hazardous materials: A review	
Probabilistic Assessment of Road Risks for Improving Logistics Processes	Utiliza redes Bayesianas, porém não tem relação com o transporte de produtos perigosos
Preliminary analysis of the dynamic interaction between Norra Länken and a subway tunnel for Stockholm, Sweden	Modelagem matemática, que cita o transporte de explosivos, mas não menciona divisão das classes.
Perceived risks of radioactive waste transport through Oregon: results of a statewide survey	Pesquisa quantitativa (questionário aplicado por telefone), que cita o transporte de explosivos, mas não menciona divisão das classes.
Monte Carlo Sensitivity Analysis of Unknown Parameters in Hazardous Materials Transportation Risk Assessment	Trata-se de um estudo descritivo com análise estatística de dados secundários.
Organisation of truck-driver training for the transportation of dangerous goods in Europe and North America	Estudo qualitativo com entrevistas baseadas em roteiro semiestruturado, que cita a classe 1
Model Research on Route Choice of Flammable and Explosive Goods by Road Transport	Estudo descritivo, proposta de modelo que cita o transporte de explosivos, mas não citam as nove classes de materiais perigosos
Developing a chaotic pattern of dynamic risk definition for solving hazardous material routing-locating problem	Estudo de caso único com proposta de modelo teórico que menciona as nove classes de materiais perigosos
Modeling urban hazmat transportation with road closure consideration	Estudo de caso com proposta de algoritmo baseado em dados secundários, que cita na introdução os componentes explosivos como materiais perigosos
Benders decomposition for the Hazmat Transport Network Design Problem	Análises testando modelo com dados secundários e proposição de modelo, que menciona as nove classes de materiais perigosos
Road transport of dangerous goods in Poland – Risk analysis	Análise de risco no transporte rodoviário de produtos perigosos nas estradas da Polónia, cálculo da probabilidade de acidentes com produtos perigosos, incluindo explosivos
Transport Routes for Dangerous Goods Deploying Real Time Big Data Analytics in Cloud Ecosystem for Hazmat Stochastic Risk Trajectories	Utilização de Big Data e Cloud Computing na criação de rotas para o transporte de produtos perigosos
Choosing Vehicle capacity to minimize risk for transporting flammable materials	Investigação do impacto das diferentes capacidades dos caminhões no risco de transporte de produtos inflamáveis

Fonte: Próprio Autor

Dentre os artigos analisados da tabela anterior foram identificados dez artigos que abordam produtos perigosos, porém, os explosivos não são o foco principal desses estudos, dois deles aplicaram a lógica FUZZY no contexto do transporte rodoviário de produtos perigosos, conforme apresentado na tabela 7.

Tabela 7: Artigos que citam materiais explosivos

ARTIGO	SÍNTESE
Risk analysis for road and rail transport of hazardous materials: a simplified approach	Simulação de risco utilizando a ferramenta TRA (Transportation Risk Analysis), específica para análise de risco de em transporte de cargas perigosas/explosivas, derivada da metodologia de "análise quantitativa de risco" QRA (Quantitative Risk Analysis).
Personal protective equipment in 1992 — The European dimension	O artigo trata sobre EPI's de um modo geral tem relação com a pesquisa devido a necessidade de EPI's no transporte de explosivos.
Risk distribution of dangerous goods in logistics subsystems	Cita uma base de dados e informa desde 1980 o número de acidentes envolvendo transporte de explosivos
THE ANALYSIS OF ORGANIZATIONAL AND LEGAL POSSIBILITIES TO REDUCE THE DANGERS RELATED TO ROAD TRANSPORT OF DANGEROUS GOODS IN POLAND	O artigo traz um estudo de caso relativo ao transporte de produtos perigosos e explosivos na Polônia, ele se concentra na análise da organização jurídica buscando a possibilidade de reduzir os perigos relacionados ao transporte desses produtos
Risk factors in the transportation of hazardous materials.	O trabalho é um estudo de caso acompanhado de um questionário com o objetivo de identificar os fatores de risco para os materiais perigosos e explosivos no Irã.
Criteria for carriage of dangerous cargo class 1 - explosives in Brazil	O artigo propõe um conjunto de critérios para os procedimentos operacionais de controle, manuseio e transporte rodoviário de cargas perigosas explosivas, sua importância está associada ao desempenho, que facilita a movimentação de materiais voláteis e extremamente perigosos.
Preliminary analysis of the dynamic interaction between Norra Länken and a subway tunnel for Stockholm, Sweden	Modelagem matemática, que cita o transporte de explosivos, mas não menciona divisão das classes.
Accidental initiation of condensed phase explosives during road and rail transport	Revisão de literatura, que cita eventos e condições que poderiam iniciar a combustão (ou ignição) dos materiais explosivos.
Organisation of truck-driver training for the transportation of dangerous goods in Europe and North America	Estudo qualitativo com entrevistas baseadas em roteiro semiestruturado, que cita a classe 1.
Perceptions of industrial risk and emergency management procedures in Hazmat Logistics: A qualitative mental model approach	Pesquisa Survey (questionário com motoristas) que cita o transporte de explosivos, mas não menciona divisão das classes.

Fonte: Próprio Autor

Os trabalhos de Hafiz e Akbar (2018) e Davies (1994) são revisões da literatura onde são abordadas causas indiretas sobre acidentes com produtos explosivos, os trabalhos de Bubbico (2004) e TANACKOV (2018) abordam ferramentas de análise de bancos de dados para o gerenciamento de riscos no transporte de produtos perigosos.

Os trabalhos de Santis (2020); Kuncyć (2003); Rosegren (1993) e Pezzullo e Luca (2009) utilizam técnicas variadas como pesquisa survey, estudos qualitativos e modelagem matemática, mas sempre abrangendo os produtos perigosos como um todo.

Essas técnicas são abordadas para os produtos perigosos das nove classes, sem distinguir suas características específicas, por exemplo, produtos inflamáveis podem explodir em caso de acidentes, mas também podem causar incêndios ou intoxicação, não há um padrão para essas consequências. Já os explosivos têm como risco principal a explosão, esses trabalhos não especificam essas características.

Os outros dois trabalhos avaliam o risco dos produtos perigosos e a utilização do método AHP para avaliar os danos potenciais em áreas expostas ao transporte rodoviário de produtos perigosos (CRISTINA *et al.*, 2016b) (BĘCZKOWSKA, 2019).

3.2. TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE PRODUTOS PERIGOSOS

O desafio associado ao transporte de materiais perigosos tem sido uma questão de estudo por acadêmicos e pesquisadores, permanecendo relevante ao longo do tempo (BATARLIENE, 2020; MADEJ; PAJAK, 2019; ZHOU *et al.*, 2022). De acordo com a literatura, a modelagem matemática é o método mais prevalente utilizado para abordar o problema de transporte de materiais perigosos (FONTAINE; MINNER, 2018). No entanto, também é possível identificar estudos que empregam abordagens de tomada de decisão multicritério, além da modelagem matemática, na análise de problemas relacionados ao transporte desses materiais. Segue uma breve descrição de alguns desses estudos (JOHAN LUNDIN, 2018; LIEGGIO JUNIOR *et al.*, 2012; TATARINOV; KIRSANOV, 2019).

O trabalho de Russo e Rindone (2013) propõem três modelos distintos para lidar com a prevenção de acidentes durante o transporte de materiais perigosos. Esses modelos têm como foco no estudo os produtos das classes 2(gases), 3 (líquidos inflamáveis) e 8 (substâncias corrosivas), os próprios autores declaram que a classificação da ONU não apresenta informações suficientes que permitem relacionar a quantidade e o perigo das substâncias transportadas.

O primeiro modelo visa reduzir ao máximo a exposição da população. O segundo modelo leva em conta a variância das consequências da rota nas decisões. Por fim, o terceiro modelo utiliza uma função de impacto explícita em sua abordagem (RUSSO; RINDONE, 2013).

Kanj e Flaus (2015) propõem uma formulação de programação em dois níveis para abordar os problemas de planejamento de redes, levando em consideração os riscos associados ao transporte de materiais perigosos. Esses riscos envolvem aspectos sociais e ambientais relacionados às decisões de roteamento dos transportadores.

YANG (2018) aborda a gestão de riscos associados a materiais perigosos, aplicando a função de qualidade em um contexto nebuloso. Os riscos são

categorizados em quatro principais domínios, que incluem aspectos relacionados a fatores humanos, materiais, impactos ambientais e gestão.

Outros estudos são voltados para questões de estoque e transporte de materiais perigosos em um contexto multinível, considerando fornecedores, fabricantes e varejistas. Em um contexto similar existem pesquisas que levam em conta as restrições de tráfego ao determinar as rotas ideais para o transporte de materiais perigosos (MADEJ; PAJAK, 2019).

Pesquisas identificaram que vários e importantes fatores de risco estão associados a ocorrência de graves acidentes rodoviários que envolvem caminhões e, dentre estes fatores de riscos, destaque-se o comportamento do motorista que exerce sua atividade, muitas vezes em alta velocidade, alcoolizado, distraído e fatigado (BATARLIENE, 2020).

Esses trabalhos demonstram a complexidade do transporte rodoviário de produtos perigosos, essa pesquisa procura demonstrar essa complexidade em relação ao transporte de produtos explosivos, agregar conhecimento e oferecer informações específicas ao transporte de produtos explosivos.

3.2.1. Riscos no Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos

O risco associado ao transporte rodoviário de materiais perigosos é sempre uma combinação da probabilidade de acidentes de trânsito e das características dos diversos materiais transportados em estradas específicas, sendo uma consideração essencial (CHAKRABARTI; PARIKH 2013; DI FAZIO et al., 2016).

Diante das preocupações do público e das regulamentações governamentais, o desafio no transporte de materiais perigosos em áreas urbanas reside em determinar a rota mais adequada para o veículo, que minimizará os custos de transporte e reduzirá o risco associado aos materiais perigosos, ao mesmo tempo em que cumpre as restrições de fechamento de estradas (FAN; CHIANG; RUSSELL 2015).

Decisões relacionadas à política de transporte terrestre incluem a seleção do veículo de transporte (como caminhão ou trem), no caso dos caminhões as condições do veículo (caçamba aberta ou coberta), em qualquer uma das escolhas o tipo de contêiner (em relação ao tamanho, tipo e configuração) e as rotas de transporte. Essas

características estão sob o controle do remetente de carga (FAROOQ *et al.*, 2020).

No entanto, mesmo com a escolha cuidadosa de rotas, acidentes envolvendo o transporte de materiais perigosos podem ocorrer no ponto de origem, durante o trajeto ou no destino, acarretando potenciais impactos, tais como perturbação do tráfego, danos à propriedade, evacuações, degradação ambiental, ferimentos e fatalidades (TORRETTA *et al.*, 2017).

Conforme discutido por Fan, Chiang e Russell (2015), o transporte de materiais perigosos em ambientes urbanos enfrenta desafios particulares que precisam ser minuciosamente considerados. Fatores críticos, como alta densidade populacional, congestionamento e obstrução das vias, devem receber atenção especial.

O congestionamento e o fechamento de vias surgem como as principais preocupações no transporte de materiais perigosos em áreas urbanas, já que, em regiões metropolitanas, o volume de tráfego e os problemas associados ao congestionamento se destacam como questões usuais, graves e intrincadas, muitas vezes exigindo longos períodos para serem resolvidos (ZHANG *et al.*, 2022). Em resposta à identificação dos riscos associados ao transporte de materiais perigosos, os governos têm adotado medidas regulatórias especiais (FAN; CHIANG; RUSSELL 2015)

Ao longo do tempo, com a consideração desses fatores, surgiu a necessidade de estabelecer regulamentações internacionais para a gestão do transporte de materiais perigosos. Essas regulamentações específicas foram desenvolvidas para abranger uma ampla gama de meios de transporte, conforme destacado por Torretta *et al.* (2017). No contexto brasileiro, a Lei nº 10.233, de 5 de junho de 2001, abordou essa questão. Em particular, seu inciso VII do artigo 22 atribuiu à Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) a competência para regulamentar o transporte de cargas perigosas.

A ANTT, por sua vez, orientada pelas diretrizes da Organização das Nações Unidas (ONU) e do Acordo Europeu para Transportes de Materiais Perigosos, estabeleceu um regulamento e resoluções para o transporte desses materiais.

O Regulamento, entre suas disposições, aborda os critérios relacionados ao transporte de cargas perigosas, incluindo documentação, responsabilidades e possíveis sanções em caso de não conformidade com o mesmo. Por outro lado, a Resolução ANTT nº 3665/2011, complementada por revisões subsequentes que culminaram na Resolução ANTT nº 5232/2016 (e suas respectivas alterações),

estabelece várias exigências. Essas exigências abrangem a correta classificação dos produtos, certificação e identificação dos volumes e embalagens, documentação, prescrições para veículos e equipamentos, e outras disposições aplicáveis, conforme apropriado.

3.2.2. Legislação Nacional sobre o Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos Classe 1 – Explosivos

No Brasil, o transporte rodoviário de explosivos está em conformidade com as orientações da ANTT e do Exército Brasileiro. O Exército Brasileiro, por meio do Ministério da Defesa e do Departamento de Comando Logístico (COLOG), estabeleceu diretrizes para a produção, transporte e comércio de explosivos, conforme detalhado na Portaria nº 42 de 28 de março de 2018. Essas diretrizes incluem especificações presentes em seu Capítulo X, que aborda o Transporte de Materiais Perigosos, destacando os seguintes critérios:

1. A emissão das Guias de Tráfego (GT) é restrita a empresas previamente registradas no Exército e autorizadas a lidar com explosivos, líquidos inflamáveis ou derramáveis, conforme registrado em seus registros.
2. O transporte de diferentes tipos de explosivos deve obedecer aos grupos de compatibilidade e, além disso, todos os veículos de transporte devem estar equipados com telefone celular ou rádio privativo e sistemas de rastreamento em tempo real.
3. As demais diretrizes normativas também são aplicáveis (COLOG, 2018).

Além das orientações da ANTT e do Exército Brasileiro são observadas as diretrizes que constam da Norma Regulamentadora 19 ou NR 19. Ela estabelece os requisitos e as medidas de prevenção para garantir as condições de segurança e saúde dos trabalhadores em todas as etapas da fabricação, manuseio, armazenamento e transporte de explosivos. Ela foi editada pela Portaria MTb 3.214, de 08 de junho de 1978, e regulamenta o inciso II do artigo 200 da Consolidação das Leis do Trabalho (CLT).

A NR 19 é importante para evitar acidentes e danos causados por explosivos, que podem ser fatais ou gerar graves consequências para os trabalhadores, o meio ambiente e a sociedade. A norma define as condições mínimas de segurança para as

instalações, os equipamentos, os procedimentos, os treinamentos, as licenças e as autorizações necessárias para o trabalho com explosivos.

As normas regulamentadoras são disposições complementares ao Capítulo V (Da Segurança e da Medicina do Trabalho) do Título II da CLT, com redação dada pela Lei nº 6.514, de 22 de dezembro de 1977. Elas visam proteger a saúde e a integridade física dos trabalhadores, bem como prevenir e controlar os riscos ocupacionais.

3.2.3. Aplicação do Método FAHP no transporte de produtos perigosos

O método FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process) é uma abordagem que combina o Analytic Hierarchy Process (AHP) com a lógica Fuzzy para lidar com incertezas e imprecisões na tomada de decisão. O AHP é um método de apoio à decisão que visa ajudar na escolha entre várias alternativas, levando em consideração múltiplos critérios. No entanto, o AHP tradicional assume que as avaliações dos critérios e das alternativas são precisas, o que nem sempre reflete a realidade.

O método FAHP introduz a lógica FUZZY para representar valores imprecisos ou incertos, permitindo que os critérios e as avaliações sejam expressos em termos de graus de pertinência, em vez de valores exatos. Isso torna o processo de tomada de decisão mais flexível e capaz de lidar com informações subjetivas. O FAHP é frequentemente aplicado em situações em que a incerteza e a imprecisão desempenham um papel importante, como na avaliação de riscos, seleção de fornecedores, priorização de projetos, entre outros.

O método FAHP é uma extensão do AHP que incorpora a lógica FUZZY para tornar as decisões mais adaptáveis a situações em que a precisão das informações é limitada ou subjetiva.

Durante a revisão da literatura observou-se que existem muitos estudos voltados ao transporte rodoviário de produtos perigosos, mas escassos em relação aos explosivos, bem como, muitos autores utilizaram diferentes metodologias para identificar e calcular os riscos que permeiam este modal. Contudo, também foi possível observar que não há trabalhos específicos voltados ao uso do FAHP para análise e cálculo dos riscos na atividade do transporte rodoviário de produtos perigosos classe 1 – explosivos.

O trabalho mais próximo encontrado foi elaborado em 2021 por Ayyildiz e Gumus, cujo objetivo é identificar os fatores de risco e seus pesos nas operações de produtos perigosos utilizando o FAHP. A pesquisa utiliza o FAHP na análise de produtos perigosos como um todo, não é aplicada especificamente aos explosivos (AYYILDIZ; TASKIN GUMUS, 2021).

4. METODOLOGIA DE PESQUISA

No capítulo de Metodologia da Pesquisa, será apresentada a estratégia metodológica adotada para abordar a pergunta de pesquisa. Esse capítulo destaca as escolhas e justificativas dos métodos, técnicas e instrumentos utilizados na coleta e análise de dados.

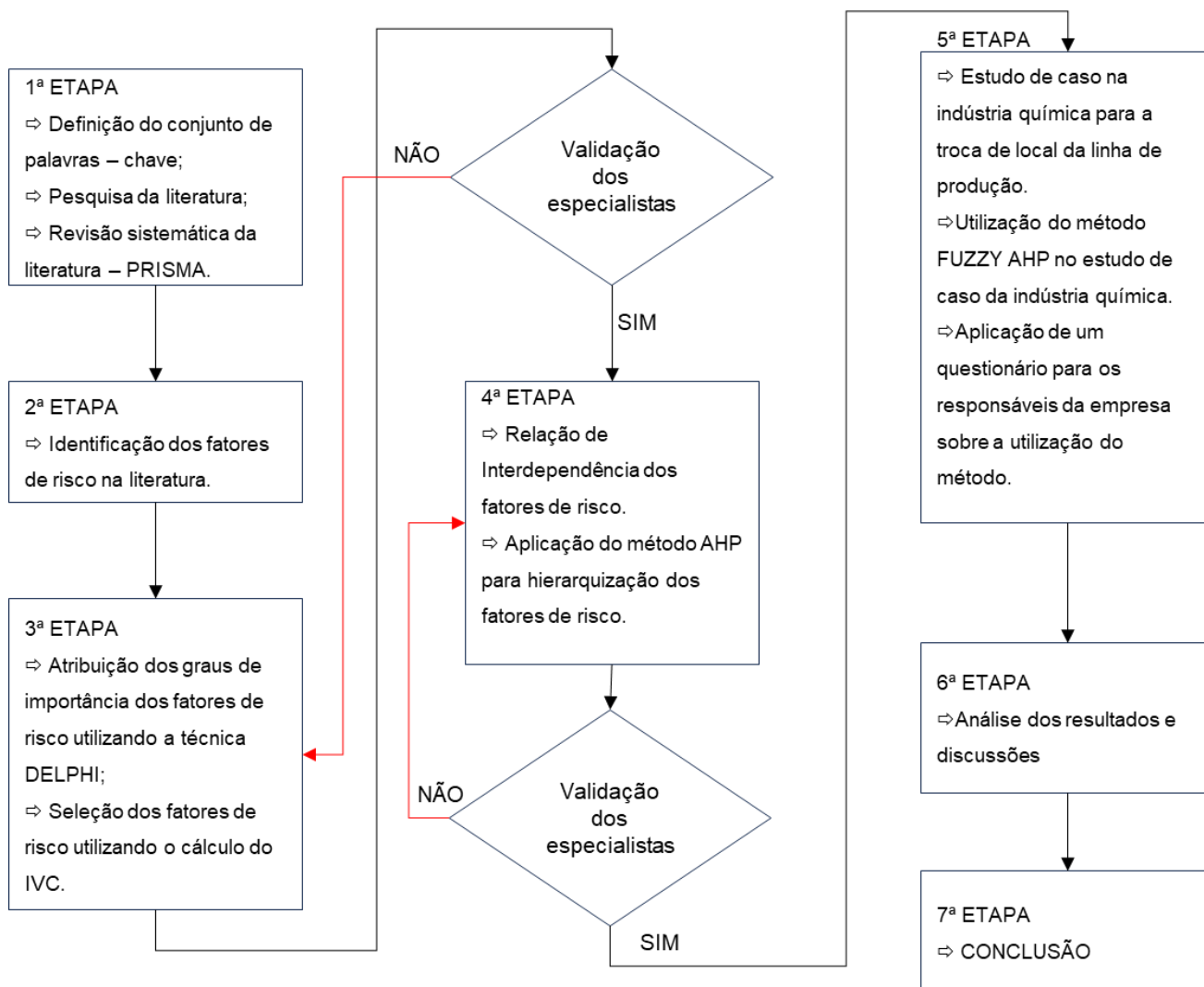
4.1. MÉTODO DE PESQUISA

Para a realização desta pesquisa foi elaborado um método de trabalho dividido em sete etapas.

Este estudo baseia-se inicialmente em uma revisão bibliográfica e, posteriormente, conduz uma pesquisa de campo com dados empíricos, visando obter informações relacionadas a um problema específico, em busca de respostas, conforme abordado por Marconi e Lakatos (2010).

A metodologia adotada neste estudo consiste na aplicação de uma pesquisa combinada, conforme delineada por Creswell (2009), que envolve a integração de abordagens quantitativas e qualitativas em um único projeto de pesquisa. A adoção da pesquisa combinada oferece a vantagem de reunir elementos de ambas as abordagens, proporcionando uma base mais abrangente para a investigação de um ou mais problemas. Nesse sentido, para uma representação visual mais clara das etapas realizadas no decorrer da pesquisa, foi desenvolvida uma estrutura do método utilizado, como exemplificado na Figura 9.

Figura 9 - Estrutura do método das etapas da pesquisa



Fonte: Próprio Autor

Essas etapas são explicadas na sequência, a partir da identificação dos fatores de risco (etapa 2), uma vez que a etapa 1 já foi explicada na revisão da literatura.

4.2. 2ª ETAPA

4.2.1. Identificação dos Fatores de Risco na Literatura

Com a revisão sistemática foi possível efetuar a identificação de um ponto importante para a pesquisa, os fatores de risco mencionados pelos autores dos artigos selecionados na revisão sistemática.

Além de recorrentes na atividade do transporte rodoviário de produtos

perigosos, os fatores de risco identificados na literatura são descritos pelos próprios autores como, elementos fundamentais para a ocorrência de acidentes, roubo ou até mesmo de ambos.

É importante salientar que outros fatores de risco foram encontrados na literatura, porém são mencionados poucas vezes e os autores não atribuem maior importância a esses fatores. Alguns exemplos de fatores de risco encontrados nas pesquisas e a frequência que foram mencionados são descritos no quadro 2 a seguir.

Quadro 2 – Fatores de risco pouco citados nas pesquisas

FATORES DE RISCO	CITAÇÕES
Agressão	2
Ano de fabricação	2
Bloqueio na estrada	3
Falta de distância segura	3
Fraude	2
Invasão da pista e manifestações	4
Roubo de containers	1
Tamanho do veículo	5
Ultrapassagem irregular	3

Fonte: Próprio Autor

Os fatores de risco da pesquisa foram escolhidos por recorrência e pelo grau de importância dos autores atribuídos a eles, o que resultou num grupo de 15 fatores de risco mais citados no transporte rodoviário de cargas e produtos perigosos.

Conforme indicado por Hartman (2003), as abordagens metodológicas tipicamente empregadas na análise dos riscos relacionados ao transporte rodoviário, particularmente no contexto das mercadorias perigosas, fundamentam-se na interação entre a probabilidade de ocorrência de acidentes e as repercussões dos próprios incidentes.

Mediante a revisão sistemática dos artigos selecionados na literatura, tornou-se possível identificar e destacar 15 fatores de risco que surgiram com frequência e foram mencionados por diversos autores. Isso resulta em uma compreensão abrangente sobre a relevância atribuída a cada um desses fatores no contexto do

transporte rodoviário de produtos perigosos, visto que a contribuição de múltiplos autores nesse campo de estudo reforça essa percepção.

Os fatores de risco mais recorrentes são: Condições das rodovias, Comportamento do motorista, Condições de tráfego, Condições do veículo, Falta de segurança, Furto, Acidente, Perfil do Motorista, Roubo, Excesso de velocidade, Características inapropriadas para o transporte, Condições de luminosidade, Condições do tempo, Desempenho de transporte inesperado e Manutenção preventiva dos equipamentos.

A tabela 8 apresenta os 15 fatores de risco mais mencionados e com maior destaque segundo os autores dos trabalhos pesquisados, conforme descrito anteriormente a escolha desses fatores de risco considerou em parte o grau de importância que cada autor atribuiu ao fator de risco, quando explícito no artigo, quando esse grau de importância não estava claro foi considerada a análise individual dos trabalhos.

Os 15 fatores de risco, referenciados pelos autores na literatura, são intrínsecos à atividade do transporte rodoviário de produtos perigosos. A presença de um ou mais desses fatores de risco durante a atividade de transporte pode modificar a probabilidade de ocorrência de acidentes.

Tabela 8: Fatores de Risco no Transporte de Produtos Perigosos Classe 1 – Explosivos

Fatores de risco	Conceitos	Exemplos	Autores
Características inapropriadas para o transporte	Entre todos os modais de transporte, o rodoviário, seja o mais adequada para o transporte de mercadorias, quer seja internacionalmente na exportação ou na Importação, quer seja no transporte nacional, bem como, nos deslocamentos de curtas medias distâncias. O transporte rodoviário é bastante recomendado para o transporte de mercadorias de alto valor agregado ou perecível.	Carregamento e Descarregamento demorados, Características da embalagem, Carregamento inapropriado, Container danificado, Excesso de carga, Carga acima do nível permitido.	Bubbico, Cave e Mazzarotta, (2004); Mohammadfam, Kalatpour e Gholamzadeh, (2020); Walendzik et al., (2021)
Condições das rodovias	Estradas inseguras, altamente congestionadas e, em diversas partes, deterioradas. Essa realidade das rodovias brasileiros atrapalha o fluxo de transporte de distribuição e ocasiona problemas com atrasos. Contudo, contratempos nas estradas resultam no descumprimento do prazo de entrega, mais um dos fatores que, junto com avarias, são fontes de transtornos por parte dos clientes.	Com buracos, com forte inclinação, com curvas acentuadas, com falta de estrutura, monótonas, com tráfego pesado, desconhecidas, com pedágios, manifestação, em manutenção, com bloqueio, Via de Mão Dupla, Via de Mão Única, Serviço de emergência inapropriado, Objeto fixo na pista, Objeto inesperado na pista, Animal na Pista, Pedestre	Bubbico, Cave e Mazzarotta, (2004); Lieggio, Araújo e Granemann, (2010); Ditta et al., (2019);
Comportamento do motorista	O comportamento é definido como o conjunto de reações de um sistema dinâmico face às interações e renovação propiciadas pelo meio onde está envolvido. Exemplos de comportamentos são: comportamento social, comportamento humano, comportamento informacional (o que o indivíduo faz em relação à informação), etc.	Consumo de álcool, Consumo de drogas, Dirigir após o efeito de estimulantes, Fadiga, Cansaço, Stress, Pânico, Imprudência, Erro, Excesso de horas ao volante, Excesso de Km percorridos durante o ano, Excesso de trabalho após o carregamento, Falta de atenção, Poucas horas de sono, Não cumprir as regras de trânsito, Uso de aparelho celular, Ultrapassagem perigosa, Ultrapassagem irregular, Falta da distância de segurança entre veículos, Perda do controle da direção, Curto espaço do veículo à frente, Falha ao verificar o espelho retrovisor	Holeczek, (2019); Yang, Chin e Li, (2018); Walendzik et al., (2021); Santos, Kawamoto, et al. (2019)
Condições de luminosidade	Implica na condição de visualização durante a viagem, bem como, pode interferir em questões relacionadas ao sono e/ou cansaço, bem como, no grau de visibilidade de um objeto e/ou ambiente.	Dirigir a noite, dirigir ao anoitecer, dirigir no início da tarde, dirigir no fim da tarde, dirigir de madrugada.	Ditta et al., (2019); Accetura, Bubbico, et al., (2014)
Condições do tempo	É baseado em dados de diferentes áreas, como a visualização do céu e análise da formação de nuvens, a temperatura observada, a pressão atmosférica.	Chuva, Neblina, Temporal.	Bubbico, Cave e Mazzarotta, (2004); Bubbico et al., (2009); Yang, Chin e Li, (2018).
Condições do tráfego	Consiste na utilização das vias por veículos motorizados, pedestres e animais de tração, para fins de circulação, parada passageira ou estacionamento.	Intenso, Lento.	Batarliené., (2008); Lieggio, Araújo e Granemann, (2010); Ditta et al., (2019);
Condições do veículo	É um fator muito importante a ser considerado na ocorrência de acidentes, sendo as condições do veículo responsáveis por um número enorme dos acidentes ocorridos no trânsito, normalmente envolvendo outros veículos, pedestres, animais e o patrimônio público.	Cabines mal projetadas, Cabines ruins, Condições ruins de conservação, Muito tempo de fabricação (modelos velhos), Falta de manutenção, Falhas do equipamento, Estouro de pneus, Problemas nas rodas, Tamanho do veículo, Tipo do veículo, Veículo pesado, Sem ventilação ou refrigeração, Válvulas do tanque com defeito, Tanques danificados, Tecnologia.	Yang, Chin e Li, (2018); Lieggio, Araújo e Granemann, (2010); Accetura, Bubbico, et al., (2014)
Desempenho de transporte inesperado	Situações que podem ocorrer antes, durante ou depois no carregamento do transporte, independente do tipo de modal, além de comprometer toda a estratégia de logística, podem acarretar sérios problemas judiciais. Esta situação pode ocorrer pela negligência, imperícia da transportadora, entre outros imprevistos.	Parada forçada, Falsa comunicação de parada, Comportamento desrespeitoso nas estradas, Empresas clandestinas de logística, Rota não definida antecipadamente, Tipo de rota, Ameaça terrorista, Rede viária, Saída da Estrada, Transporte irregular, Ilegal, Clandestino.	Saderova, Rosava, et al., (2020); Holeczek, (2019); Walendzik et al., (2021)

Fonte: Próprio Autor

Tabela 8: Fatores de Risco no Transporte de Produtos Perigosos Classe 1 – Explosivos (continuação)

Falta de segurança	Entre todas as etapas, a segurança no transporte é um aspecto desafiador. Como a atividade de movimentação de carga pressupõe a coordenação de operações internas e externas, o controle deve ser preciso e rigoroso para que tudo ocorra bem.	Armazém, Invasão, Fraude, Bloqueio na estrada, Localização Ruim, Vazamento de informações, Serviço de emergência inapropriado.	Santis, et al. (2020); Ekwall, (2014); Ekwall, (2015); Lant, (2015)
Furto	O furto é quando a vítima não está presente e seu bem é tomado sem seu conhecimento. Por exemplo, quando você faz uma parada e, enquanto está longe, o veículo é aberto e a carga é levada sem que ninguém note. Também há o chamado "furto qualificado", que ocorre quando o criminoso danifica a propriedade durante a ação, como quebrar uma trava ou uma janela. O prejuízo é o mesmo, mas a diferença é o nível de violência na ação.	Parcial, Total, Desvio da Carga, Apropriação Indébita, Perda da Carga.	Zheng, (2018); Lu, (2018); Santos, Kawamoto, et al. (2019); Ekwall, (2015); Lant, (2015)
Manutenção Preventiva nos equipamentos (dos veículos)	Presença de veículos de transporte antigos e em péssimas condições de conservação. A consequência para isso é grave: falta de segurança nas estradas, atrasos constantes na entrega de mercadorias e alto custo com a manutenção da frota.	Pneus, Freios, Lanternas, Tecnologia.	Yang, Chin e Li, (2018); Accetura, Bubbico, et al., (2014)
Acidentes	Evento inesperado e indesejável que causa danos pessoais, materiais (danos ao patrimônio), danos financeiros e que ocorre de modo não intencional.	Capotamento, Deslizamento, Avaria, Colisão, Tombamento, Derramamento, Vazamento, Contaminação, Explosão, Incêndio.	Tanackov et al., (2018); Lieggio, Araújo e Granemann, (2010); Holeczek, (2019);
Perfil do motorista	É sabido que um dos maiores desafios da logística como um todo é a dificuldade de encontrar profissionais capacitados e experientes. O transporte é uma atividade delicada e de alta responsabilidade. Além disso, esses colaboradores precisam lidar com níveis intensos de estresse durante sua atividade. Contar com motoristas qualificados é imprescindível. Para isso, empresas precisam oferecer treinamentos, boas condições de trabalho e salário compatível com o mercado.	Idade, Problemas familiares, Problema emocional, Problemas psicológico, Problema de saúde, Condição social, Nível de treinamento, Tipo de habilitação, Nível de capacitação, Alimentação Ruim.	Santos, Kawamoto, et al. (2019); Yang, Chin e Li, (2018); Lieggio, Araújo e Granemann, (2010)
Roubo	O primeiro problema apresentado tem relação com a segurança de caminhões, cargas e motoristas na estrada. Trata-se de um dos maiores desafios a se enfrentar no país - o roubo - e que, só no ano de 2016, provocou um prejuízo de R\$1,4 bilhão ao setor. Atualmente, existem inúmeras quadrilhas especializadas no roubo de cargas, com aparelhamento e técnicas cada vez mais evoluídas, o que salienta ainda mais a necessidade de encarar o problema com seriedade e estratégia.	Carga, Caminhão, Containers, Paletes, Sequestro, Desengate da carreta, Transbordo da carga, Homicídio, Estupro, Agressão.	Yang, (2010); Hung, (2010); Zheng, (2018); Urioll, (2011)
Excesso de Velocidade	O excesso de velocidade é a desobediência aos limites de velocidade expostos nas vias, limites de velocidade em impostos pelo veículo e as características da carga.	Ultrapassar a velocidade permitida na via, desrespeitar os limites da carga e do veículo.	Bubbico et al., (2009); Tanackov et al., (2018); Lieggio, Araújo e Granemann, (2010);

Fonte: Próprio Autor

4.3. 3ª ETAPA

4.3.1. Atribuição dos Graus de Importância dos Fatores de Risco utilizando o Método DELPHI

Durante essa etapa, os fatores de risco foram avaliados quanto à sua importância por meio do método DELPHI, que envolve a consulta a especialistas na área, foram realizadas três consultas (rodadas). Nesse processo, os especialistas atribuíram pesos a dez fatores, embora quinze fatores de risco tenham sido selecionados com base na literatura.

Foram convidados dez especialistas para participar do processo, são eles:

Oficiais do G.A.T.E (Grupo de Ações Táticas Especiais) da polícia militar do estado de São Paulo, Engenheira química responsável pelo departamento de compras de uma indústria química onde são fabricadas matéria prima para produtos explosivos e alguns explosivos sob encomenda, Gerente de produção da mesma indústria química responsável pela produção de matéria prima para fabricação de explosivos.

Três capitães reformados do corpo de bombeiros do estado de São Paulo com experiência no atendimento a acidentes com produtos explosivos nas rodovias administradas pelo governo estadual. Oficiais da polícia militar do Estado de São Paulo com treinamento em armazenamento, transporte e manejo de munição e experiência no atendimento a ocorrências com explosivos em caixas eletrônicos, roubos a banco e carros forte.

Bacharel em química com mais de vinte anos de experiência na empresa SHELL do Brasil, atuou com equipes na área de segurança no transporte e armazenamento de produtos da empresa;

Escrivão do D.E.I.C, (Departamento Estadual de Investigações Criminais), trabalha a mais de vinte anos no setor de investigações de roubos relacionados a bancos, empresas de transporte de valores e nos processos da modalidade de roubo conhecida como “novo cangaço”.

A exclusão de cinco fatores de risco da avaliação do grau de importância pelos especialistas foi motivada pela pesquisa realizada na NR-19 (Norma

Regulamentadora), a qual estabelece medidas de proteção para a segurança e saúde no trabalho com explosivos. De acordo com essa norma, os cinco fatores de risco selecionados na literatura são considerados obrigatórios e imprescindíveis, conforme evidenciado na Tabela 9.

Dessa forma, foi explicado aos especialistas que tais fatores não poderiam ser excluídos.

Tabela 9: Fatores de Risco imprescindíveis para o transporte de produtos explosivos

FATOR DE RISCO	DESCRIÇÃO NR – 19
Características inapropriadas para o transporte	Não se aplica, pois a NR-19, 19.4.2 - b "os serviços de embarque e desembarque devem ser assistidos por um fiscal da empresa transportadora, devidamente habilitado;"
Condições de luminosidade	Não se aplica, pois a NR-19, 19.4.2 - k "salvo casos especiais, os serviços de carga e descarga de explosivos devem ser feitos durante o dia e com tempo bom;"
Condições do tempo	Não se aplica, pois a NR-19, 19.4.2 - k "salvo casos especiais, os serviços de carga e descarga de explosivos devem ser feitos durante o dia e com tempo bom;"
Desempenho de transporte inesperado	Não se aplica, tendo em vista a observância da norma NR-19, não há contratos com empresas nessas condições...NR-19, 19.6.3, 19.6.5.
Manutenção Preventiva nos equipamentos (dos veículos)	Não se aplica, tendo em vista a observância da norma NR-19, não há contratos com empresas nessas condições...NR-19, 19.6.3, 19.6.5.

Fonte: Próprio Autor

Assim os especialistas avaliaram dez fatores de risco dos quinze extraídos da literatura, foi dado a eles cinco graus de relevância: 1 – Não é Relevante, 2 – Pouco Relevante, 3 – Relevante, 4 – Muito Relevante e 5 – Altamente Relevante.

4.3.2. Seleção dos Fatores de Risco Utilizando o Cálculo do IVC – Índice de Validade de Conteúdo

Para avaliar a importância dos fatores de risco, foi utilizado um método amplamente reconhecido para a avaliação de conteúdo (HYRKAS et al., 2003).

O Índice de Validade de Conteúdo (IVC) é empregado nesse contexto e mensura a proporção ou porcentagem de especialistas que concordam com determinados aspectos do instrumento e de seus itens. O cálculo do IVC envolve a divisão da soma dos valores atribuídos por cada especialista pelo produto do número de especialistas e o número de notas possíveis, nesse caso cinco notas, conforme descrito na fórmula de cálculo do IVC (KINJO, 2021).

$$IVC = \frac{\textit{soma valores}}{n^{\text{o}} \textit{ especialistas} \times \textit{notas possíveis}}$$

Com a participação dos 10 especialistas para atribuição do grau de importância à cada um dos fatores de risco com uma pontuação classificada em: 1 não é relevante, 2 pouco relevante, 3 relevante, 4 muito relevante e 5 altamente relevante.

Por meio do IVC foi possível identificar os fatores de risco com menor pontuação e, assim, excluir estes fatores uma vez que, na concepção dos especialistas, são fatores de risco considerados menos relevante à operação do transporte rodoviário de produtos explosivos.

Desta forma, de acordo com o resultado verificado em todos os questionários preenchidos e, conforme o entendimento dos especialistas, os fatores de risco “condições do tráfego” e “excesso de velocidade” foram excluídos, indicando fatores que não representam relevância para a atividade do transporte rodoviário de produtos explosivos. Conforme visto na subseção 4.3.2.

A Tabela 10 apresenta o resultado consolidado referente ao grau de importância que foi dado à cada um dos fatores de risco, o qual indica os fatores de risco “condições do tráfego” e “excesso de velocidade” com a menor pontuação.

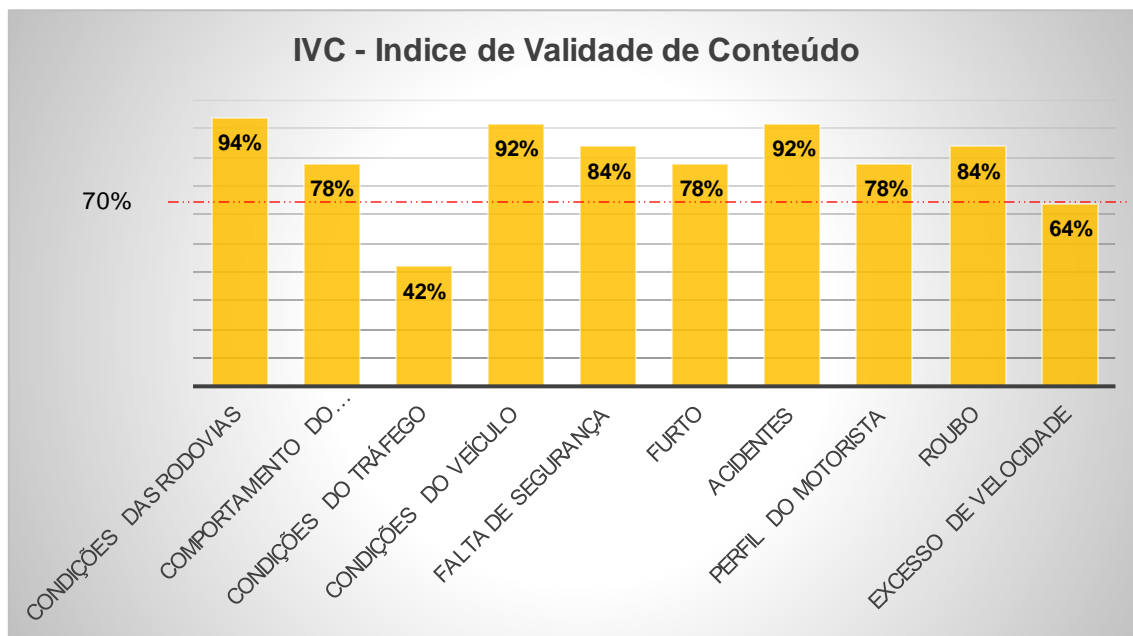
Tabela 10: Classificação dos fatores de risco segundo Delphi e IVC

Fatores de risco		Esp. 1	Esp. 2	Esp. 3	Esp. 4	Esp. 5	Esp. 6	Esp. 7	Esp. 8	Esp. 9	Esp. 10	Soma	IVC
1	Condições das rodovias	5	4	4	5	5	5	5	4	5	5	47	94%
2	Comportamento do motorista	5	2	1	4	3	5	5	4	5	5	39	78%
3	Condições do tráfego	1	5	5	2	1	1	2	1	1	2	21	42%
4	Condições do veículo	5	4	4	5	5	5	5	4	5	4	46	92%
5	Falta de segurança	5	4	4	4	5	4	4	4	4	4	42	84%
6	Furto	2	5	5	4	5	4	3	4	4	3	39	78%
7	Acidentes	3	4	4	5	5	5	5	5	5	5	46	92%
8	Perfil do motorista	5	5	5	4	3	3	4	3	3	4	39	78%
9	Roubo	5	3	4	4	4	4	4	4	5	5	42	84%
10	Excesso de Velocidade	4	3	4	4	2	3	2	4	2	4	32	64%

Fonte: Próprio Autor

Os resultados obtidos são apresentados na figura 10

Figura 10 – Índice de Validade dos Fatores de Risco



Fonte: Próprio Autor

Segundo Alexandre e Coluci (2011) e Belluci e Matsuda (2012) os valores abaixo de 70% de validade devem ser excluídos da pesquisa, dessa forma os fatores de risco condições do tráfego (42%) e excesso de velocidade (64%) foram excluídos, restando oito fatores de risco para serem utilizados na pesquisa.

4.4.4ª ETAPA

4.4.1. Relação de Interdependência dos Fatores de Risco

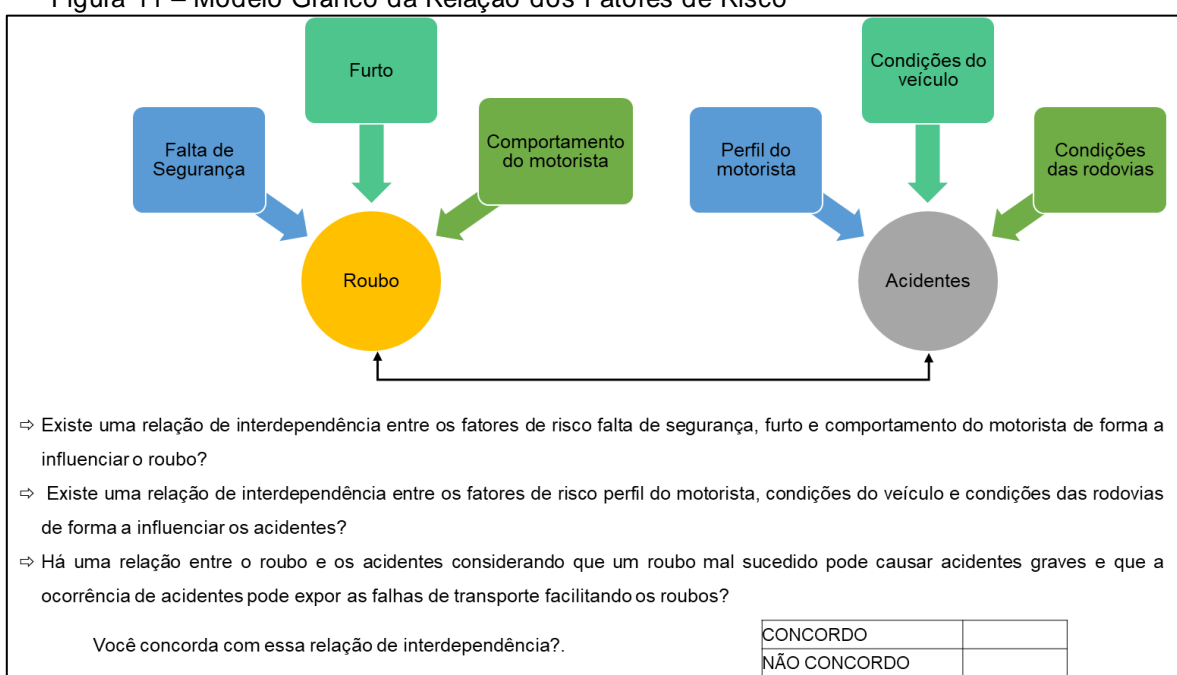
Os fatores de risco roubo e acidentes são a consequência da fragilidade e deficiência em outros fatores, ou possuem aspectos semelhantes. Por esse motivo as empresas de seguro sempre classificam as ocorrências como roubo ou acidentes, para depois analisarem as causas (LOPES, 2019; TELES, 2020). Utilizando essas informações foi proposta a relação de interdependência dos fatores, tendo como referência o roubo e os acidentes.

4.4.2. Validação da Relação de Interdependência dos Fatores de Risco

A figura 11 mostra o modelo gráfico com os fatores de risco posicionados de acordo com a proposta de relação de interdependência. O modelo foi enviado aos 10 especialistas para que fosse feita a validação desta relação. Este modelo é derivado do trabalho de Teles (2020) e foi aprimorado para ser utilizado com a técnica Fuzzy-AHP, é uma contribuição para a pesquisa dos produtos explosivos.

Nas próximas seções é explicado passo a passo a validação da interdependência e o agrupamento dos fatores de risco.

Figura 11 – Modelo Gráfico da Relação dos Fatores de Risco



Fonte: Próprio Autor

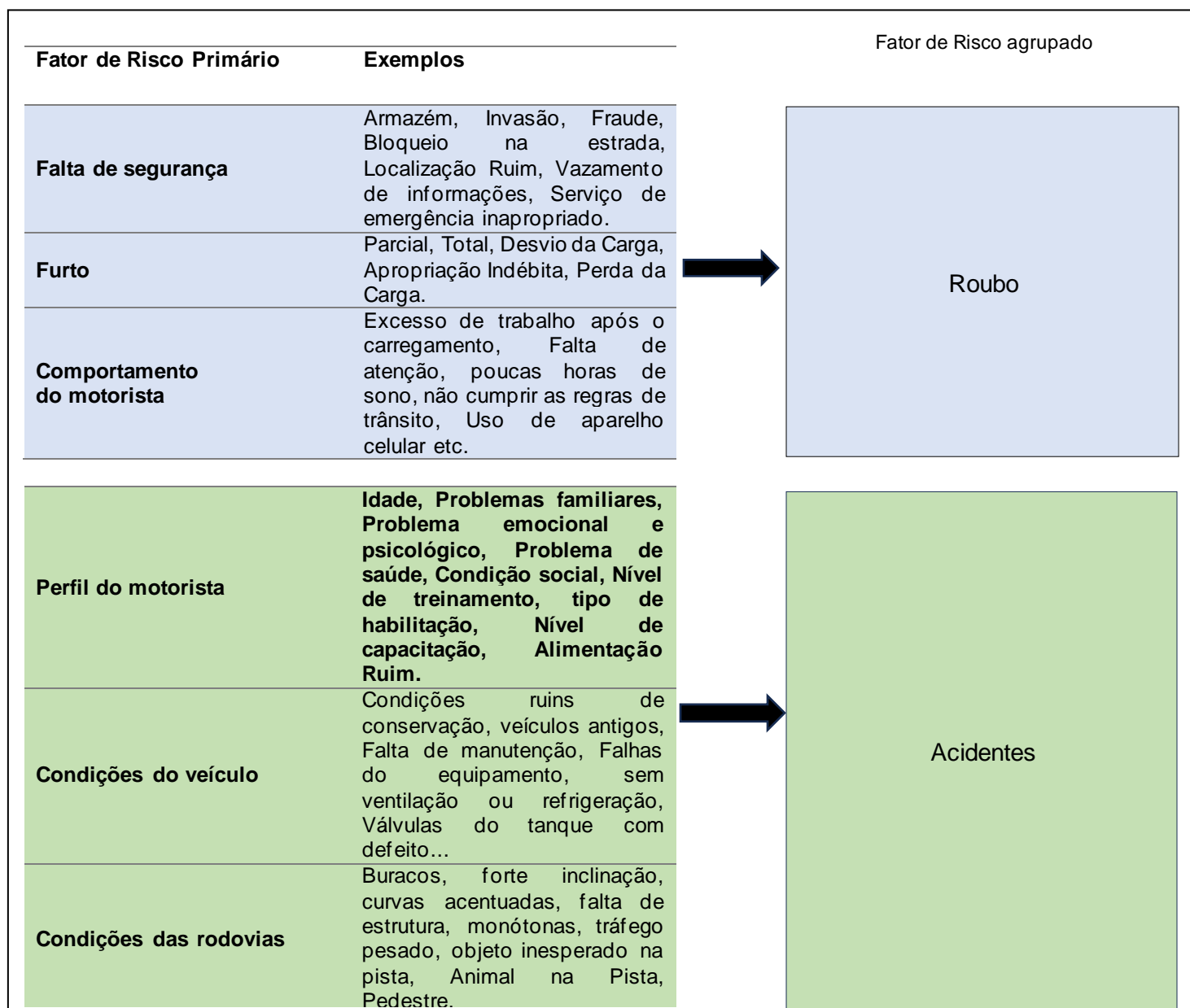
Os especialistas analisaram o modelo e conforme as informações que eles possuíam da pesquisa e da experiência com produtos explosivos eles concordaram com a proposta apresentada, sendo assim possível realizar o agrupamento dos fatores.

4.4.3. Agrupamento dos Fatores de Risco

Com a identificação e seleção dos dez fatores de risco foi possível realizar um agrupamento destes fatores, pois as características de alguns são muito semelhantes dessa forma, foi possível estabelecer dois grupos de fatores de risco em torno dos

fatores roubo e acidente, Tabela 11.

Tabela 11: Agrupamento dos fatores de risco



Fonte: Próprio Autor

4.4.4. Agrupamento do Fator de Risco Roubo

O roubo no caso de produtos explosivos não é realizado de forma oportunista ou de ocasião, por ser um produto muito específico existem quadrilhas especializadas nesse tipo de roubo. O roubo desses produtos exige planejamento e organização, esses “requisitos” levam a observação por parte dessas quadrilhas a observar várias situações e comportamentos que estão relacionados aos fatores de risco (WALENDZIK *et al.*, 2021) (ACCETTURA *et al.*, 2014).

Alguns cenários, exemplos e hipóteses serão descritos a seguir para compreensão das relações de interdependências e agrupamento dos fatores de risco.

É importante destacar que esse agrupamento foi realizado por meio de consulta aos dez especialistas da área, os fatores de risco: falta de segurança, furto e comportamento do motorista possuem características que cooperam para o roubo.

O fator de risco falta de segurança pode ser observado de dois ângulos, tanto do roubo como de acidentes, mas nessa pesquisa, ele foi associado aos roubos pois em todas as ocorrências de roubo frustradas pela ação policial ou pela imperícia de assaltantes resultaram em acidentes.

Os acidentes são o resultado da falta de segurança óbvia nas ocorrências de roubo tanto as bem-sucedidas como as mal-sucedidas, nas ocorrências com sucesso da subtração do produto muitas vezes ocorrem acidentes posteriores devido a inabilidade de manuseio dos assaltantes, já nas ocorrências sem sucesso de subtração dos produtos sempre ocorrem acidentes relacionados a situação extraordinária.

O fator de risco furto, muitas vezes é o resultado do planejamento das quadrilhas que não tem a ação efetiva do roubo imediato da carga, mas realiza ações parciais como desvio de carga com a colaboração de funcionários das empresas, se aproveitam de situações criadas artificialmente em conluio com terceiros para furtar pequenas partes de carregamentos de grande porte.

O comportamento do motorista tem como consequência a redução do cuidado e da atenção com a carga, sendo um facilitador no planejamento de roubos e também de acidentes.

4.4.5. Agrupamento do Fator de Risco Acidente

Em relação ao agrupamento dos fatores de risco ao redor do acidente o processo é semelhante, alguns exemplos descritos sobre o perfil do motorista demonstram sua relação com os acidentes, falta de treinamento, problemas de saúde e psicológicos, baixo nível de capacitação podem facilitar a ocorrência de acidentes (TELES, 2020).

As condições dos veículos e das rodovias são fatores chave na ocorrência de acidentes, a falta de manutenção preventiva dos veículos e das rodovias, falhas nos equipamentos dos veículos, falta de sinalização adequada e fiscalização das rodovias

aumentam a ocorrência de acidentes (BERNATIK *et al.*, 2021; XIA *et al.*, 2020).

4.4.6. Aplicação do Método Fuzzy AHP para Hierarquização Fatores de Risco

Nessa etapa está sendo utilizada o método Fuzzy AHP para criar um ranking hierárquico dos fatores de risco em caso de acidentes e/ou roubos no transporte de produtos explosivos, o AHP fornece a possibilidade de comparação par a par entre os seis fatores de risco selecionados anteriormente como causa do roubo e/ou de acidentes (FELISONI *et al.*, 2022).

A técnica Fuzzy AHP apresenta uma vantagem ao possibilitar que o usuário atribua, de maneira intuitiva, pesos relativos a múltiplos critérios ou múltiplas alternativas para um dado critério. Os critérios adotados são os fatores de risco encontrados na literatura e trabalhados nas etapas anteriores.

Concomitantemente, é viabilizada uma comparação par a par entre eles, essa abordagem permite identificar, mesmo diante de duas variáveis incomparáveis, por meio do conhecimento e experiência dos especialistas consultados, qual fator de risco é considerado mais importante (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Para a aplicação do método Fuzzy AHP foi elaborado um modelo de questionário com base na escala comparativa de Saaty utilizada para comparação pareada (BORJA PIMENTA *et al.*, 2019).

O questionário foi aplicado aos dez especialistas que atribuíram os pesos relativos à importância de cada um dos fatores de risco de forma a comparar essa importância entre eles. Por exemplo o especialista número 1 atribui um peso comparando o fator de risco condições das rodovias em relação ao comportamento do motorista, caso a condição da rodovia fosse mais importante ele escolhe o valor próximo a esse fator de risco.

Após a escolha dos especialistas foi realizado o cálculo da média ponderada das escolhas para então preencher os valores da matriz de comparação de critérios. Tabela 12, e calcular o “ranking” dos fatores de risco.

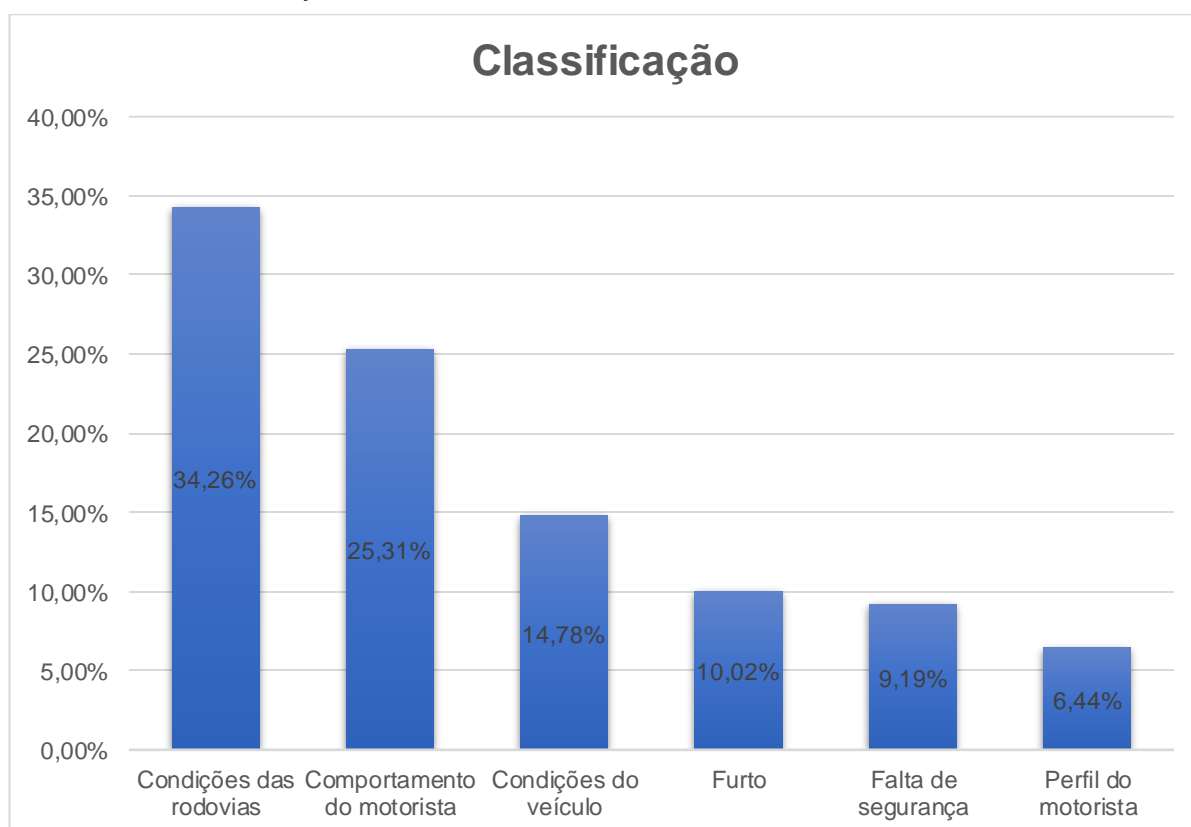
Tabela 12: Matriz de comparação de fatores de risco

FATORES DE RISCO	Condições das rodovias	Comportamento do motorista	Condições do veículo	Falta de segurança	Furto	Perfil do motorista
Condições das rodovias	1	7	3	3	5	9
Comportamento do motorista	0,1429	1	5	9	3	7
Condições do veículo	0,3333	0,2000	1	3	5	3
Falta de segurança	0,3333	0,1111	0,3333	1	1	3
Furto	0,2000	0,3333	0,2000	1,0000	1	5
Perfil do motorista	0,1111	0,1429	0,3333	0,3333	0,2000	1
TOTAL	2,1206	8,7873	9,8667	17,3333	15,2000	28,0000

Fonte: Próprio Autor

Dessa forma o “ranking”, ou classificação de importância dos fatores de risco na opinião dos especialistas foi calculada conforme o quadro 3.

Quadro 3: Classificação dos fatores de risco



Fonte: Próprio Autor

Esse ranking auxilia na visualização da importância individual de cada fator de risco, sua utilização na construção de um modelo facilita uma visão geral de cada um dos fatores e sua respectiva colocação.

É importante destacar a diferença entre comportamento do motorista e perfil do motorista, o perfil do motorista é considerado quando da admissão do profissional pela empresa ou da sua contratação em caso de prestador de serviço, o perfil do motorista é um resumo dos traços característicos do profissional (HOLECZEK, 2019; LIEGGIO *et al.*, 2012).

Já o comportamento do motorista é a sua relação orgânica com o ambiente de trabalho em que é exposto, nesse sentido o comportamento pode se alterar conforme ambiente e condições de trabalho (SANTOS *et al.*, 2019; WALENDZIK *et al.*, 2021; YANG *et al.*, 2018a) .

5 ESTUDO DE CASO APLICADO À INDÚSTRIA QUÍMICA

O estudo de caso aplicado a indústria química é a quinta etapa da elaboração dessa pesquisa, nessa etapa foi utilizado o método Fuzzy AHP para a tomada de decisão da empresa em relação a produção de produtos explosivos e sua matéria prima.

Os responsáveis pela empresa ficaram interessados na aplicação do método Fuzzy AHP para auxiliar na tomada de decisão da mudança física da linha de produção da matéria prima de produtos explosivos.

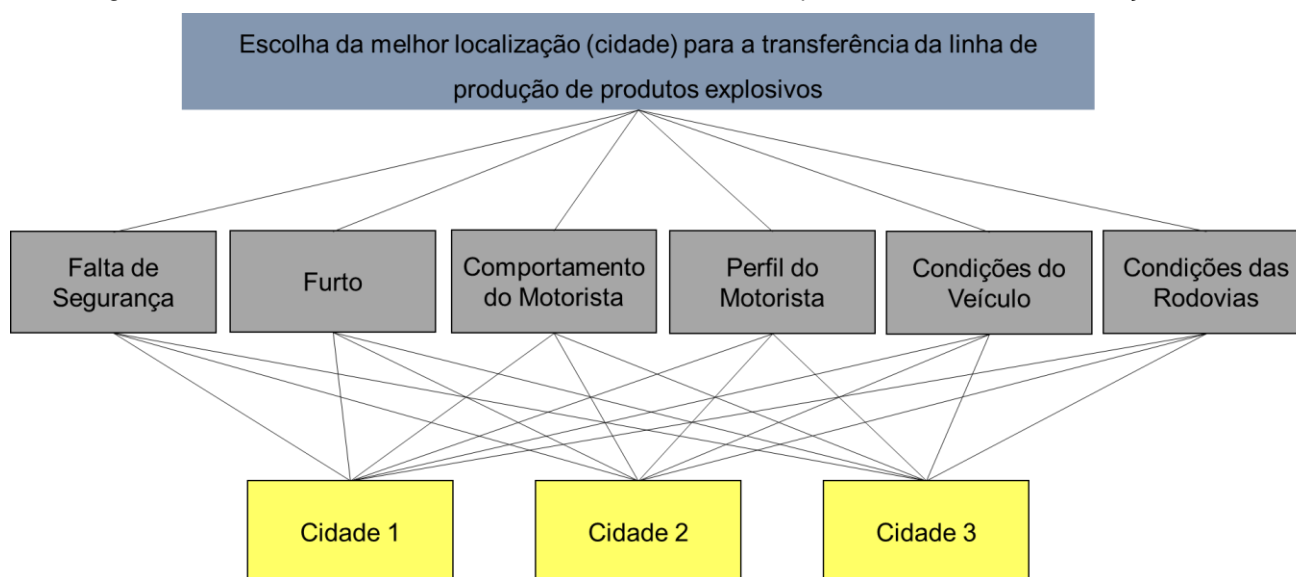
Essa linha de produção é compartilhada com a fabricação de outros produtos na unidade de Guarulhos, em termos financeiros a empresa tem consolidado os valores a serem utilizados na mudança.

Porém, a preocupação dos responsáveis é a movimentação logística dos produtos, a empresa tem as seguintes opções:

- 1 – A mudança da linha de produção para outra área dentro do terreno da empresa na cidade 1;
- 2 – A mudança para um galpão da empresa na cidade 2;
- 3 – A mudança para um galpão da empresa na cidade 3.

Para a realização do estudo de caso foi elaborado o modelo de decisão baseado no método Fuzzy AHP, mostrado na figura 12.

Figura 12 – Modelo de Decisão AHP na Escolha da Cidade para a nova Linha de Produção



Fonte: Próprio Autor

5.1 Utilização do Método Fuzzy AHP no Estudo de Caso da Indústria Química

Após a elaboração do modelo de decisão para o estudo de caso quatro especialistas da empresa foram convidados para a aplicação do método Fuzzy AHP, são eles: o diretor presidente da empresa, o gerente de produção, a engenheira química responsável pelo departamento de compras e a diretora comercial da empresa.

Como eles já haviam participado das etapas anteriores esses especialistas foram orientados a preencher a matriz de comparação de critérios AHP, também foram informados sobre o processo de “fuzzificação” para obtenção dos resultados. A matriz preenchida é mostrada na Tabela 13.

Tabela 13: Matriz de comparação de critérios preenchida pelos especialistas da empresa

FATORES DE RISCO	Condições das rodovias	Comportamento do motorista	Condições do veículo	Falta de segurança	Furto	Perfil do motorista
Condições das rodovias	1	3	3	9	5	9
Comportamento do motorista	0,3333	1	5	7	3	7
Condições do veículo	0,3333	0,2000	1	3	3	3
Falta de segurança	0,1111	0,1429	0,3333	1	1	3
Furto	0,2000	0,3333	0,3333	1,0000	1	3
Perfil do motorista	0,1111	0,1429	0,3333	0,3333	0,3333	1
TOTAL	2,0889	4,8190	10,0000	21,3333	13,3333	26,0000

Fonte: Próprio Autor

O processo de fuzzificação foi realizado pelo cálculo da média geométrica dos valores obtidos na tabela 13, conforme a tabela 14 a seguir.

Tabela 14: Cálculo de “fuzzificação” dos fatores de risco

FATORES DE RISCO	MÉDIA GEOMÉTRICA		
Condições das rodovias	3,1748	3,9230	4,6101
Comportamento do motorista	2,4019	2,5015	3,5636
Condições do veículo	1,2735	1,1029	2,1630
Falta de segurança	1,0026	0,5013	1,5439
Furto	0,9448	0,6368	1,6046
Perfil do motorista	0,7803	0,2894	1,2016
TOTAL	9,5779	8,9549	14,6868
REVERSÃO	0,1044	0,1117	0,0681
ORDEM CRESCENTE	0,0681	0,1117	0,1044

Fonte: Próprio Autor

Após essa etapa foi realizada a comparação de cada uma das cidades em relação ao fator de risco específico, conforme as tabelas a seguir.

Comparação do fator de risco Condições das rodovias em relação as três cidades, tabela 15.

Tabela 15: Cálculo da comparação do fator de risco Condições das rodovias em relação as três cidades

FATOR DE RISCO - CONDIÇÕES DAS RODOVIAS						
	Cidade 1	Cidade 2	Cidade 3			
Cidade 1	1	3	5	2	2,4662	2,8845
Cidade 2	0,3333	1	3	1,1006	1,0000	1,7472
Cidade 3	0,2000	0,3333	1	0,8110	0,4055	1,1696
TOTAL				3,9116	3,8717	5,8013
Reversão de dados				0,2556	0,2583	0,1724
Ordem crescente				0,1724	0,2583	0,2556

Fonte: Próprio Autor

Comparação do fator de risco Comportamento do motorista em relação as três cidades, tabela 16.

Tabela 16: Cálculo da comparação do fator de risco Comportamento do motorista em relação as três cidades

FATOR DE RISCO - COMPORTAMENTO DO MOTORISTA						
	Cidade 1	Cidade 2	Cidade 3			
Cidade 1	1	3	5	2	2,4662	2,8845
Cidade 2	0,3333	1	3	1,1006	1,0000	1,7472
Cidade 3	0,2000	0,3333	1	0,8110	0,4055	1,1696
TOTAL				3,9116	3,8717	5,8013
Reversão de dados				0,2556	0,2583	0,1724
Ordem crescente				0,1724	0,2583	0,2556

Fonte: Próprio Autor

Comparação do fator de risco Condições do veículo em relação as três cidades, tabela 17.

Tabela 17: Cálculo da comparação do fator de risco Condições do veículo em relação as três cidades

FATOR DE RISCO - CONDIÇÕES DO VEÍCULO						
	Cidade 1	Cidade 2	Cidade 3			
Cidade 1	1	3	5	2	2,4662	2,8845
Cidade 2	0,3333	1	7	1,5874	1,3264	2,2013
Cidade 3	0,2000	0,1429	1	0,8818	0,3057	1,1110
TOTAL				4,4692	4,0983	6,1968
Reversão de dados				0,2238	0,2440	0,1614
Ordem crescente				0,1614	0,2440	0,2238

Fonte: Próprio Autor

Comparação do fator de risco Falta de segurança em relação as três cidades, tabela 18.

Tabela 18: Cálculo da comparação do fator de risco Falta de segurança em relação as três cidades

FATOR DE RISCO - FALTA DE SEGURANÇA						
	Cidade 1	Cidade 2	Cidade 3			
Cidade 1	1	3	5	2	2,4662	2,8845
Cidade 2	0,3333	1	9	1,7472	1,4422	2,3713
Cidade 3	0,2000	0,1111	1	0,8926	0,2811	1,1006
TOTAL				4,6397	4,1896	6,3564
Reversão de dados				0,2155	0,2387	0,1573
Ordem crescente				0,1573	0,2387	0,2155

Fonte: Próprio Autor

Comparação do fator de risco Furto em relação as três cidades, tabela 19.

Tabela 19: Cálculo da comparação do fator de risco Furto em relação as três cidades

FATOR DE RISCO - FURTO						
	Cidade 1	Cidade 2	Cidade 3			
Cidade 1	1	3	3	1,587401052	2,0801	2,5198
Cidade 2	0,3333	1	7	1,5874	1,3264	2,2013
Cidade 3	0,3333	0,1429	1	0,8298	0,3625	1,1507
TOTAL				4,0046	3,7689	5,8719
Reversão de dados				0,2497	0,2653	0,1703
Ordem crescente				0,1703	0,2653	0,2497

Fonte: Próprio Autor

Comparação do fator de risco Perfil do motorista em relação as três cidades, tabela 20.

Tabela 20: Cálculo da comparação do fator de risco Furto em relação as três cidades

FATOR DE RISCO - PERFIL DO MOTORISTA						
	Cidade 1	Cidade 2	Cidade 3			
Cidade 1	1	3	5	2	2,4662	2,8845
Cidade 2	0,3333	1	3	1,1006	1,0000	1,7472
Cidade 3	0,2000	0,3333	1	0,8110	0,4055	1,1696
TOTAL				3,9116	3,8717	5,8013
Reversão de dados				0,2556	0,2583	0,1724
Ordem crescente				0,1724	0,2583	0,2556

Fonte: Próprio Autor

Em seguida foram normalizados os valores Fuzzy das cidades em comparação com os fatores e risco, tabela 21.

Tabela 21: Cálculo de normalização dos pesos Fuzzy

Pesos FUZZY normalizados						
	Condições das rodovias	Comportamento do motorista	Condições do veículo	Falta de segurança	Furto	Perfil do motorista
Cidade 1	0,5445	0,5445	0,5445	0,5445	0,4609	0,5445
Cidade 2	0,2834	0,2834	0,3734	0,4054	0,3734	0,2834
Cidade 3	0,1721	0,1721	0,1631	0,1608	0,1681	0,1721

Fonte: Próprio Autor

Os resultados obtidos para a escolha da cidade são apresentados na tabela 22.

Tabela 22: Resultados para a escolha da cidade onde será implantada a nova linha de produção

	Resultados agregados			
	PESOS hierarquia	Cidade 1	Cidade 2	Cidade 3
Condições das rodovias	0,3565	0,5445	0,2834	0,1721
Comportamento do motorista	0,2558	0,5445	0,2834	0,1721
Condições do veículo	0,1368	0,5445	0,3734	0,1631
Falta de segurança	0,0896	0,5445	0,4054	0,1608
Furto	0,0951	0,4609	0,3734	0,1681
Perfil do motorista	0,0662	0,5445	0,2834	0,1721
		0,5365	0,3152	0,1695

Fonte: Próprio Autor

5.1.1. Hierarquização Fatores de Risco

Após o preenchimento dos valores da matriz de comparação de critérios, obtidos por meio de consenso dos participantes, foi utilizada uma planilha do Microsoft Excel para realizar os cálculos necessário do método Fuzzy AHP, dessa forma obteve-se o grau de importância (hierarquização) dos fatores de risco, conforme demonstrado na Tabela 23.

Tabela 23: Classificação do grau de importância de cada fator de risco

FATORES DE RISCO	Grau de Importância
Condições das rodovias	35,65%
Comportamento do motorista	25,58%
Condições do veículo	13,68%
Falta de segurança	8,96%
Furto	9,51%
Perfil do motorista	6,62%

Fonte: Próprio Autor

Essa hierarquia possibilita identificar a importância dos fatores de risco e assim entender de forma segura a atenção que cada um deles deve ter e sua prioridade no processo do transporte de produtos explosivos.

5.1.2. Resultado proposto pelo método Fuzzy AHP para a escolha da cidade

Todos os processos matemáticos do método Fuzzy AHP descritos nas subseções 2.7, 2.8 e 2.9 foram realizados em uma planilha do Microsoft Excel. É importante destacar que durante a revisão da literatura não foi encontrado nenhum modelo que realize esse processo especificamente para o transporte de produtos explosivos.

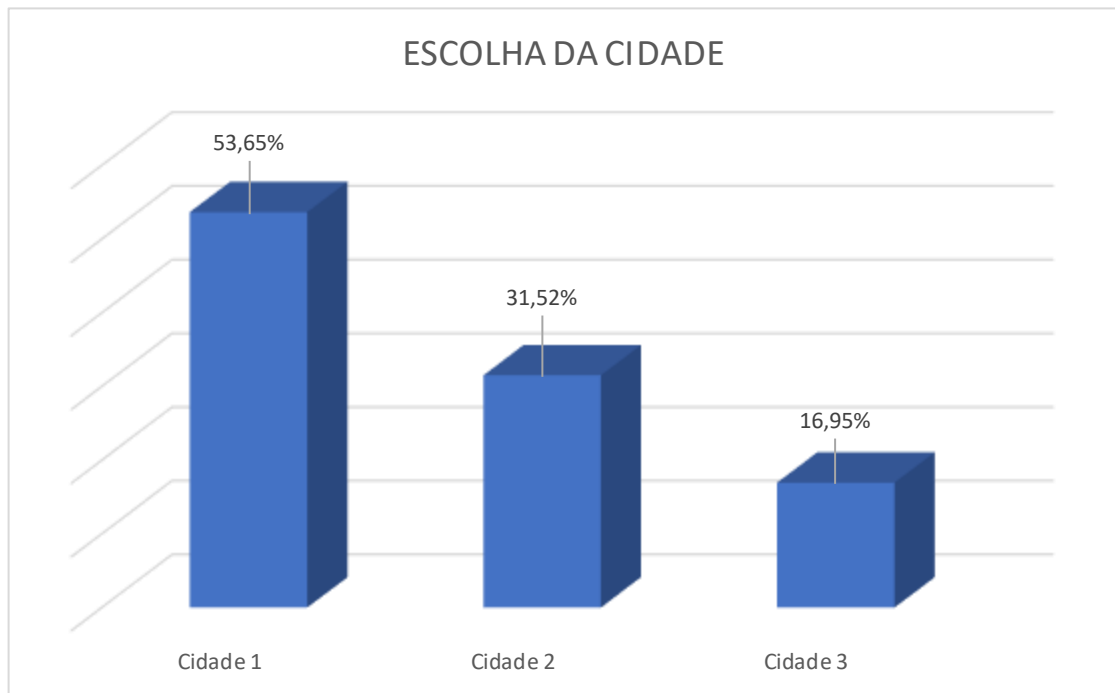
A criação de um modelo computacional é uma importante contribuição tanto para a literatura como para a prática, podendo ser aplicado ao setor do transporte de produtos explosivos, que conforme já foi descrito anteriormente tende a crescer devido a necessidade crescente da mineração de metais, principalmente para a recém-criada indústria de veículos elétricos.

O resultado do método Fuzzy AHP expressa a priorização relativa de alternativas com base nos critérios estabelecidos pelos decisores. Em outras palavras, fornece uma medida de preferência ou importância relativa das alternativas em relação aos critérios considerados. O resultado é tipicamente apresentado na forma de um vetor de prioridades que indica a contribuição relativa de cada alternativa para a tomada de decisão.

A grandeza expressa nos resultados do Fuzzy AHP é uma medida de ponderação que reflete as preferências dos decisores e considera a incerteza associada a essas preferências. As prioridades são calculadas levando em conta as comparações par a par feitas pelo decisor, a hierarquia dos critérios e a lógica Fuzzy para lidar com a incerteza nas comparações.

De forma simplificada o resultado desse processo é mostrado na figura 13.

Figura 13 – Resultado da Escolha da Cidade para a nova Linha de Produção



Fonte: Próprio Autor

A cidade 1 obteve em termos percentuais mais de cinquenta por cento da preferência dos responsáveis pela empresa, mostrando ser a melhor escolha na opinião dos responsáveis pela empresa, a cidade 3 por sua vez demonstrou um valor percentual muito baixo, isso demonstra que há diversos fatores contrários para sua escolha. No capítulo 6 esses resultados serão discutidos com mais detalhes.

5.1.3. Aplicação de um questionário para os responsáveis da empresa sobre a utilização do método

Foi aplicado aos decisores da empresa um questionário para verificar opinião deles a respeito da utilização do método Fuzzy AHP nesse processo de decisão, foram feitas cinco perguntas em formato de escala de Likert e uma pergunta dissertativa, a seguir o modelo do questionário aplicado.

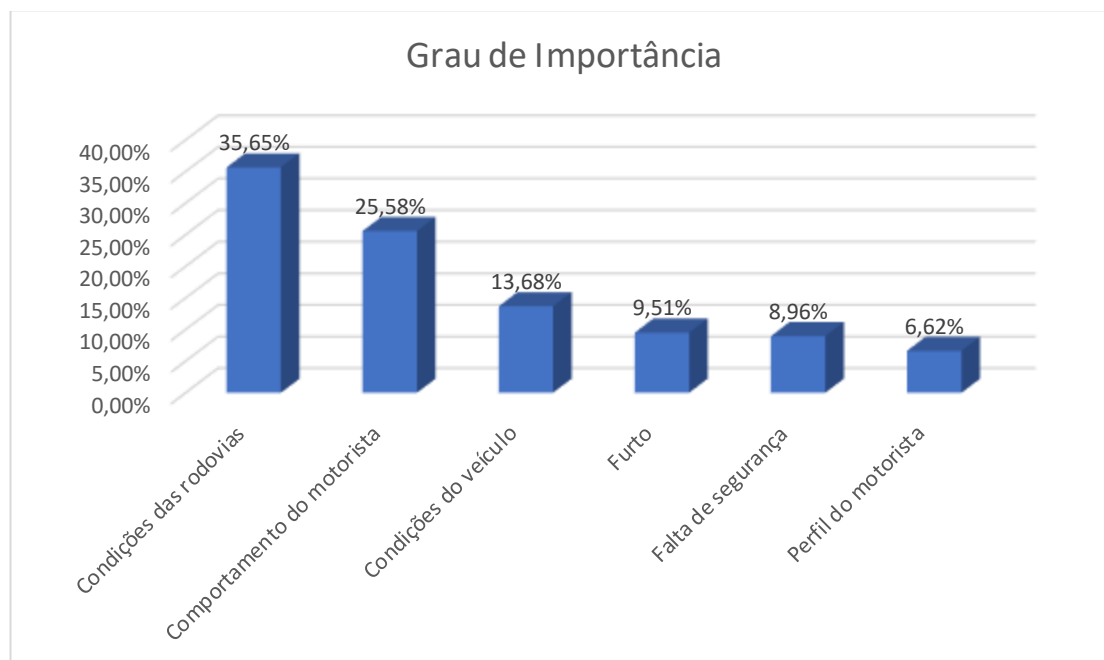
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nessa seção serão discutidos os resultados obtidos nas fases da pesquisa e no estudo de caso apresentado no trabalho.

6.1 Classificação dos Fatores de Risco

Na subseção 5.1.1 foi realizada a hierarquização/classificação dos fatores de risco, após os responsáveis pela empresa preencherem os dados da matriz de comparação dos fatores de risco, com a utilização do Microsoft Excel os fatores foram classificados da seguinte forma: Condições das Rodovias como o mais importante com grau de 35,65%, em segundo o Comportamento do Motorista com grau de 25,58%, em terceiro as Condições do Veículo com 13,68%, em quarto o Furto com 9,51%, a Falta de Segurança com 8,96% em quinto lugar e o Perfil do Motorista em sexto lugar com grau de importância de 6,62%. O gráfico da figura 14 demonstra essa classificação.

Figura 14 – Classificação dos Fatores de Risco segundo o Fuzzy AHP



Fonte: Próprio Autor

O fator de risco de risco Condições das Rodovias por ser o mais importante reflete a preocupação dos responsáveis pela empresa em relação a logística, essa é a maior preocupação deles em relação a mudança da linha de produção, os três locais

são de propriedade da empresa e o custo de mudança já é considerado no setor financeiro.

Porém, a principal preocupação reside na fase pós-implantação, uma vez que se trata de uma escolha de caráter definitivo devido às exigências dos órgãos públicos a serem cumpridas, bem como à necessidade de conformidade com as normas e legislações nos âmbitos federal, estadual e municipal.

O Comportamento do Motorista também é uma preocupação pois esse fator de risco pode influenciar tanto nos roubos como nos acidentes. Já as condições do veículo também é um dos fatores mais importantes, esses três fatores têm relação com a logística dos produtos fabricados e sua matéria prima.

Os fatores de risco: falta de segurança, furto e perfil do motorista tem grau de importância semelhante, os três estão abaixo dos 10% e com valores bem próximos entre si, principalmente furto e falta de segurança, já o perfil do motorista foi considerado como o fator de risco com menor impacto, esse fator tem a possibilidade de ser alterado de forma mais rápida e simples que os outros, pois requer ações exclusivas da empresa em relação aos colaboradores.

6.2 Resultados do Estudo de Caso

Na seção anterior foi realizado o estudo de caso com as preferências dos decisores considerando a incerteza associada a essas preferências, a cidade 1 ficou em primeiro lugar na preferência com 53,65% de preferência, a cidade 2 em segundo lugar com 31,25% e a cidade 3 em terceiro com 16,95% de preferência.

É importante notar que a diferença entre as três cidades é considerável, a cidade 1 obteve mais de 50% da preferência, a cidade tem acesso a duas rodovias federais, a rodovia Presidente Dutra a principal rodovia do país, ela é o elo rodoviário entre São Paulo e o Rio de Janeiro e atravessa uma das regiões mais ricas do país o vale do Paraíba.

Outra rodovia federal muito importante que passa por essa cidade é a rodovia Fernão Dias, principal ligação de São Paulo a Minas Gerais, um importante estado na mineração e extração de diversos minérios.

Esses acessos facilitam a logística dos produtos fabricados pela empresa, tanto em relação a entrega aos clientes como o recebimento da matéria prima.

Um dado interessante a ser analisado em relação à escolha da cidade 1 é a baixa importância dos fatores de risco furto e falta de segurança, as duas rodovias são atendidas pela Polícia Rodoviária Federal (PRF), na extensão da rodovia há uma delegacia da PRF em Guarulhos e outra em São José dos Campos, também são encontradas quatro unidades operacionais, Bonsucesso, São José dos Campos, Caçapava e Lavrinhas.

No estado do Rio de Janeiro há uma delegacia da PRF na cidade de Resende e unidades operacionais em Barra Mansa e Seropédica. A rodovia no trecho entre o Rio de Janeiro e São Paulo é concedida a concessionária CCR.

Já a rodovia Fernão Dias possui duas unidades operacionais no estado de São Paulo, uma na cidade de Atibaia e outra na cidade de Vargem, no estado de Minas Gerais a rodovia possui duas delegacias, onze postos operacionais e uma superintendência.

Esses dados podem explicar a sensação de maior segurança em relação da escolha da cidade 1.

6.3 Análise dos Resultados

A análise dos resultados no contexto do método Fuzzy AHP é importante para avaliar como variações nos parâmetros e na entrada de dados podem afetar os resultados (GUL et al., 2019). Essa análise visa compreender a robustez das conclusões obtidas diante de diferentes cenários e ajustes nos critérios Fuzzy (AYYILDIZ; TASKIN GUMUS, 2021).

Durante a análise no Fuzzy AHP, é comum examinar como pequenas variações nos valores de entrada, como funções de pertinência ou pesos atribuídos aos critérios, impactam as prioridades finais (SANTOS et al., 2017). Essa avaliação é essencial para compreender a estabilidade das decisões tomadas e identificar quais elementos têm maior influência nos resultados.

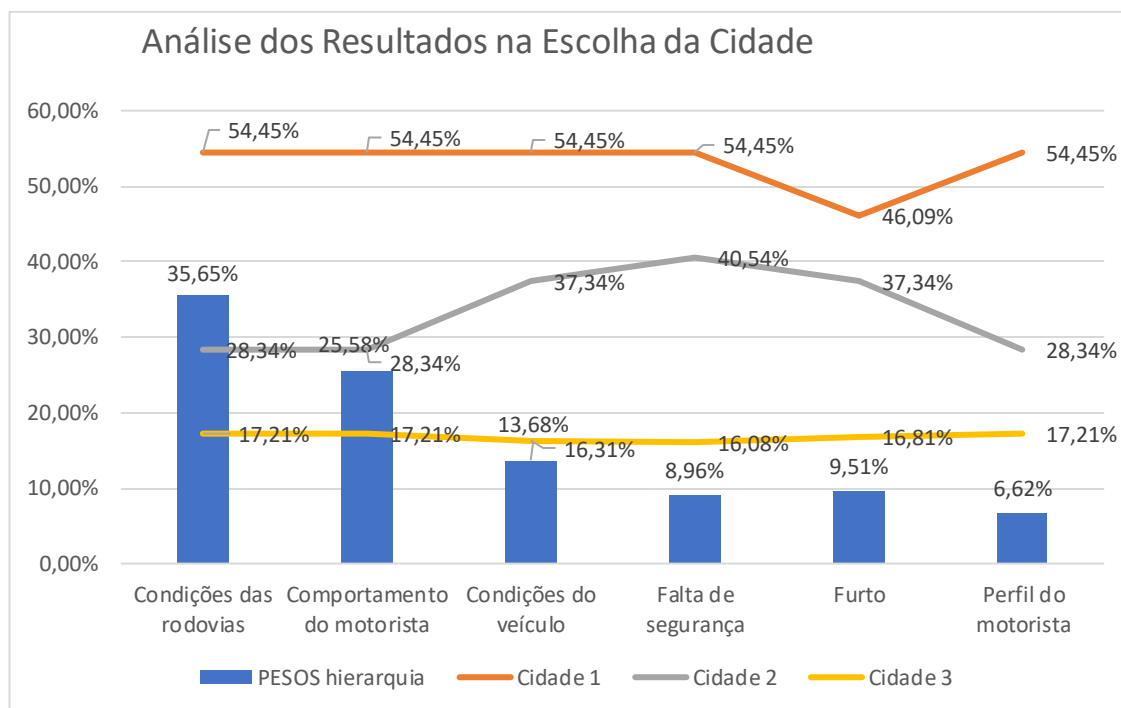
Além disso, a análise dos resultados permite explorar a resposta do modelo a mudanças nas preferências dos decisores, na formulação dos critérios fuzzy ou em outras variáveis relevantes. Isso contribui para uma compreensão mais aprofundada das fontes de incerteza e imprecisão no processo decisório, oferecendo insights valiosos para aprimorar a robustez e confiabilidade do método Fuzzy AHP (JUNIOR et al., 2021).

Antes de iniciar a análise de cada um dos critérios é importante destacar que os fatores de risco estão diretamente relacionadas com a localização física (cidade) escolhida para a instalação da nova linha de produção da empresa.

Por exemplo, a condição das rodovias é uma escolha relacionada com as rodovias de acesso de cada uma das cidades propostas, os motoristas, ajudantes e funcionários do transporte serão escolhidos em grande parte na região onde a linha de produção estiver instalada, esse fato influencia os fatores comportamento e perfil do motorista, a manutenção dos veículos será realizada na região da cidade escolhida, logo o fator de risco condições do veículo será impactado por esse fato.

Os fatores, falta de segurança e furto também serão analisados segundo a região das cidades colocadas como alternativas. O processo de análise será realizado com base no gráfico da figura 15 a seguir.

Figura 15 – Resultados da Escolha das cidades



Fonte: Próprio Autor

Observa-se com detalhes os valores da preferência da cidade 1 em relação as outras, todos fatores de risco tem uma preferência alta em relação as cidades 2 e 3, apenas o fator furto na cidade 1 tem valor inferior a cinquenta por cento. Um destaque importante é o fator falta de segurança, na cidade 2 ele tem um valor maior que o dobro em relação a cidade 3. A seguir nas próximas subseções cada um desses fatores são analisados separadamente.

Análise do Fator de Risco Condições das Rodovias

O fator de risco condição das rodovias foi o mais importante escolhido durante a pesquisa, a cidade de cidade 1 foi a mais bem colocada nesse fator com 54,45% das preferências, em segundo vem a cidade 2 com 28,34% e terceiro a cidade 3 com 17,21% das preferências.

Esses resultados indicam que para os decisores as rodovias na cidade 1 estão em melhores condições do que das outras cidades.

Análise do Fator de Risco Comportamento do Motorista

Para os decisores a cidade de cidade 1 tem 54,45% de preferência nesse fator, seguida pela cidade 2 com 28,34% e a cidade 3 com 17,21% das preferências. Nesse caso a cidade 1 também se mostra preferível em relação as outras cidades.

Análise do Fator de Risco Condições do Veículo

Esse fator de risco teve a preferência de 54,45% para a cidade 1, 37,34% para a cidade 2 e 16,31% para a cidade 3.

Os dados demonstram que a cidade 1 oferece maiores condições para a conservação dos veículos em relação as outras cidades.

Análise do Fator Falta de Segurança

A segurança foi mais bem avaliada na cidade 1, pois a preferência pela cidade foi de 54,45%, ou seja, os recursos oferecidos pela região demonstram que ela é mais segura que as outras, a cidade 2 também demonstrou boa avaliação nesse fator com 40,54% da preferência, já a cidade 3 se mostrou a menos segura com 16,08% das preferências.

Análise do Fator de Risco Furto

Esse fator de risco também foi mais bem avaliado na cidade 1, porém com um índice menor, 46,09%, a cidade 2 ficou em segundo lugar com 37,34% e a cidade 3 com 16,81%.

Análise do Fator de Risco Perfil do Motorista

O perfil do motorista também foi mais bem avaliado em relação a cidade 1 com

54,45%, a cidade 2 ficou em segundo lugar com índice de 28,34% e a cidade 3 em terceiro com 17,21% de preferência. Vale destacar que os valores foram semelhantes aos do fator de risco comportamento do motorista nas três cidades.

Como pode ser observado a cidade 1 foi a mais bem avaliada em todos os fatores de risco, o gráfico sugere que a escolha da cidade para a instalação da nova linha de produção de produtos explosivos e suas matérias primas é a melhor solução para a empresa.

7 DISCUSSÃO

A discussão dos resultados obtidos nas fases da pesquisa e no estudo de caso apresentado revela insights sobre a tomada de decisão em situações complexas (SAATY, 2008; SAATY; KATZ, 1990), como a escolha da localização para a instalação de uma nova linha de produção. A combinação da hierarquização dos fatores de risco e a análise das preferências dos decisores permite uma compreensão mais profunda das variáveis envolvidas e suas inter-relações, oferecendo um panorama abrangente para embasar a decisão estratégica (AYYILDIZ; TASKIN GUMUS, 2021).

A classificação dos fatores de risco, conforme realizada na subseção 5.1.1, evidencia a importância atribuída a diferentes aspectos, sendo as Condições das Rodovias, o Comportamento do Motorista e as Condições do Veículo os fatores mais relevantes (BĘCZKOWSKA, 2019). Esses elementos estão ligados à logística da empresa, refletindo uma preocupação central com a eficiência operacional e a segurança no transporte de produtos e matéria-prima.

Contudo, a análise se estende além da identificação dos fatores de risco mais significativos, mergulhando na especificidade de cada cidade considerada no estudo de caso. A preferência manifestada pelos decisores em relação à cidade 1 não se fundamenta unicamente na prevalência dos fatores positivos, como a condição das rodovias e a segurança, mas também na ponderação das variáveis que exercem influência direta sobre esses fatores (MADEJ; PAJAK, 2019).

A existência de rodovias federais de grande importância e a infraestrutura de segurança ao longo dessas vias são elementos cruciais que sustentam a escolha.

A análise detalhada dos resultados, sob a perspectiva do método Fuzzy AHP, revela a robustez das conclusões diante de diferentes cenários e ajustes nos critérios. A sensibilidade do modelo a pequenas variações nos valores de entrada é evidenciada, ressaltando a importância de compreender as fontes de incerteza e imprecisão no processo decisório (BATARLIENE, 2020).

Essa compreensão aprofundada não só valida as escolhas feitas, mas também permite identificar áreas de aprimoramento e refinamento no método utilizado.

A relação direta entre os fatores de risco e a localização física das cidades analisadas destaca a importância de considerar o contexto geográfico e infraestrutural ao tomar decisões estratégicas (FAROOQ *et al.*, 2020). A análise individual de cada fator de risco em relação às cidades oferece uma visão mais clara das vantagens e desvantagens de cada opção, embasando a decisão final de maneira mais sólida.

Em resumo, os resultados obtidos indicam a cidade 1 como a escolha mais adequada para a instalação da nova linha de produção, tendo em vista suas vantagens em termos de infraestrutura rodoviária, segurança e outras variáveis. Essa conclusão não apenas valida a abordagem metodológica adotada, mas também proporciona insights para a empresa, auxiliando-a na tomada de decisões estratégicas futuras e na mitigação de riscos associados à sua operação logística.

8 CONCLUSÃO

Essa pesquisa teve como ponto de partida a escassez de trabalhos voltados para o transporte rodoviário de produtos perigosos classe 1, explosivos, uma vez que a literatura descreve produtos perigosos de forma generalizada, não utiliza a classificação dos produtos conforme a tabela da ONU, os trabalhos se concentram em produtos com “natureza explosiva”, ou seja, produtos que em caso de acidentes tem como consequência a explosão, mas, não são fabricados com essa finalidade.

O objetivo geral dessa pesquisa foi investigar os riscos associados ao transporte rodoviário de produtos explosivos e a possibilidade de desenvolver um modelo para a avaliação prevenção e gerenciamento dos fatores de risco associados a esse tipo de transporte.

O uso do método FUZZY AHP (FAHP) proporcionou uma abordagem flexível e abrangente, considerando a incerteza desse contexto, foi possível atribuir valores FUZZY para representar as imprecisões, lidar com as ambiguidades nas comparações, permitiu atribuir graus de importância a diferentes critérios, refletindo a realidade de que nem todos os critérios têm o mesmo peso na tomada de decisão.

A pesquisa aprofunda o entendimento científico dos riscos associados a produtos explosivos, preenchendo uma lacuna na literatura sobre análise dos riscos no transporte rodoviário desses produtos. Além disso, busca desenvolver modelos de apoio à decisão, fundamentados teoricamente, para prever o comportamento dos produtos em diferentes cenários de transporte. A abordagem inclui a combinação de técnicas, como FAHP para lidar com subjetividade, DELHPI para selecionar fatores de risco relevantes e IVA para classificar esses fatores no contexto do transporte rodoviário de produtos perigosos.

A pesquisa identifica os fatores de risco mais relevantes no transporte rodoviário de produtos explosivos, visando criar ações mitigatórias mais assertivas. Com potencial para aprimorar estratégias e promover a segurança, a pesquisa pode contribuir significativamente para a redução de incidentes prejudiciais nesse contexto. Seus resultados têm relevância para a indústria de transporte, reguladores e partes interessadas, oferecendo diretrizes aplicáveis para a melhoria de políticas e práticas de segurança.

A pesquisa impôs algumas limitações, como o processo necessitou do auxílio

de especialistas na área e do tempo disponível por parte da empresa pesquisada, houve a necessidade de ajustes em relação a alguns procedimentos.

Este trabalho prepara o terreno para pesquisas futuras, incluindo a criação de um modelo, utilizando uma linguagem de programação apropriada, a fim de facilitar e difundir a aplicação do método.

Outra pesquisa interessante pode ser a inclusão desse modelo a softwares já utilizados na cadeia de suprimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/institucional/index.html>>. Acessado em: 04 Out. 2023.

ACCETTURA, A.; BUBBICO, R.; GARZIA, F.; MAZZAROTTA, B. Improving security in road transportation of hazardous materials. **International Journal of Safety and Security Engineering**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 289–305, 2014.

ARAÚJO, F. A.; DOS REIS, J. G. M.; DA SILVA, M. T.; AKTAS, E. A Fuzzy Analytic Hierarchy Process Model to Evaluate Logistics Service Expectations and Delivery Methods in Last-Mile Delivery in Brazil. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 14, n. 10, 2022.

AYYILDIZ, E.; TASKIN GUMUS, A. Pythagorean fuzzy AHP based risk assessment methodology for hazardous material transportation: an application in Istanbul. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 28, n. 27, p. 35798–35810, 2021.

BARZILAI, J.; GOLANY, B. Ahp Rank Reversal, Normalization And Aggregation Rules. **INFOR: Information Systems and Operational Research**, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 57–64, 1994.

BATARLIENE, N. Essential safety factors for the transport of dangerous goods by road: A case study of Lithuania. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 12, 2020.

BEATRIZ, H.; ROZADOS, F. O uso da técnica Delphi como alternativa metodológica para a área da Ciência da Informação. [s. l.], 2015.

BĘCZKOWSKA, S. The method of optimal route selection in road transport of dangerous goods. *Em: TRANSPORTATION RESEARCH PROCEDIA*, 2019, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.]: Elsevier B.V., 2019. p. 1252–1259.

BERNATIK, A.; REHAK, D.; COZZANI, V.; FOLTIN, P.; VALASEK, J.; PAULUS, F. Integrated environmental risk assessment of major accidents in the transport of hazardous substances. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 13, n. 21, 2021.

BOLDRINI, J. L.; COSTA, S.; FIGUEIREDO, V.; WETZLER, H. Álgebra Linear. [s. l.], 1980.

BORJA PIMENTA, L.; BELTRÃO, N. E. S.; GEMAQUE, A. M. da S.; AMADOR TAVARES, P. Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. **Interações (Campo Grande)**, [s. l.], p. 407–420, 2019.

BUBBICO, R.; CAVE, S. Di; MAZZAROTTA, B. Risk analysis for road and rail transport

of hazardous materials: A GIS approach. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, [s. l.], v. 17, n. 6, p. 483–488, 2004.

BUENO, W. P.; REZER, J. A. P.; MARTHA, K. A.; BUENO, V. P. FrameWork FUZZY AHP. **Rev. Elet. Gestão e Serviços**, [s. l.], v. 10, n. 2177–7284, p. 1–26, 2019.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Disponível em: < <https://cetesb.sp.gov.br/emergencias-quimicas/estatisticas/>>. Acessado em: 12 Fev. 2024.

CEZAR DE OLIVEIRA, J.; FELIPE, A.; LIBRANTZ, H.; CARDOSO, G.; NETO, O. Aplicação do Método AHP para Seleção de Provedores de Serviços Logísticos de Transportes para o Setor de Cargas Expressas. [S. l.: s. n.], 2017.

CHANG, D.-Y. **European Journal of Operational Research Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP** *European Journal of Operational Research*. [S. l.: s. n.], 1996.

CHAKRABARTI, U. K.; PARIKH, J. K. A societal risk study for transportation of class-3 hazmats – A case of Indian state highways. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 91, p. 275-284, 2013.

CHEN, F.; WANG, C.; WANG, J.; ZHI, Y.; WANG, Z. Risk assessment of chemical process considering dynamic probability of near misses based on Bayesian theory and event tree analysis. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, [s. l.], v. 68, 2020.

CNT, 2023. **Anuário CNT do Transporte – 2018 – Malha Rodoviária Total**, Confederação Nacional do Transporte. Disponível em: < <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2018/Rodoviaro/1-3-1-1-1-/Malha-rodovi%C3%A1ria-total> >. Acessado em: 29 Out. 2023.

CNT, 2018. **Anuário CNT do Transporte – 2018 – Malha Rodoviária Total**, Confederação Nacional do Transporte. Disponível em: < <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2018/Rodoviaro/1-3-1-1-1-/Malha-rodovi%C3%A1ria-total> >. Acessado em: 29 Set. 2023.

COLOG. COMANDO LOGÍSTICO. Portaria nº 42, de 28 de março de 2018. Dispõe sobre procedimentos administrativos relativos às atividades com explosivos e seus acessórios e produtos que contêm nitrato de amônio.

CRESWELL, J.W., Research design – qualitative, **quantitative and mixed methods**

approaches. 3.ed. Thousand Oaks, CA: Sage, 2009.

CRISTINA, M.; PACHECO, R.; GOLDMAN, F. L. O AHP como um modelo matemático: uma análise de sensibilidade simples. [S. l.: s. n.], 2016a.

CRISTINA, M.; PACHECO, R.; GOLDMAN, F. L. O AHP como um modelo matemático: uma análise de sensibilidade simples. [S. l.: s. n.], 2016b.

DAVIES, P. A. Accidental initiation of condensed phase road and rail transport explosives during. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.: s. n.], 1994.

DE PONTES, J. C. Impactos de Vizinhança Proporcionados pelo Desmonte de Rocha com uso de Explosivos: Estudo de Caso na “Mineração Dantas Gurgel & CIA LTDA”, CAICÓ-RN. [S. l.: s. n.], 2013.

DIAZ-CAMACHO, B.; RESTREPO-PRADA, D.; QUINTERO, C. G. M.; VILORIA-NUNEZ, C.; QUIROGA-AMAYA, J. Computational Tool for Technological Risk Assessment in the Transport of Chemical Products. *Em*: 2022 IEEE ANDESCON: TECHNOLOGY AND INNOVATION FOR ANDEAN INDUSTRY, ANDESCON 2022, 2022, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022.

DI FAZIO, A.; BETTINELLI, D.; LOUETTE, E.; MECHIN, J. P.; ZAZZA, M.; VECCHIARELLI, P.; DOMANICO, L. European pathways to introduce EGNOS and Galileo for dangerous goods transport. **Transportation Research Procedia**, v. 14, p. 1482-1491, 2016.

DITTA, A.; FIGUEROA, O.; GALINDO, G.; YIE-PINEDO, R. A review on research in transportation of hazardous materials. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2019.

F. UNIKASARI; I. IFTADI; W.A. JAUHARI; D. DANARDONO. Study of the Factors That Affecting Automobile Seat Comfort. [S. l.]: IEEE, 2013. 2013.

FABIANO; GOULART. Auxílio à Decisão Utilizando o Método AHP Análise Competitiva dos Softwares Estatísticos. [S. l.: s. n.], 2010.

FAN, T.; CHIANG, W. C.; RUSSELL, R. Modeling urban hazmat transportation with road closure consideration. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s. l.], v. 35, p. 104–115, 2015.

FAROOQ, D.; MOSLEM, S.; TUFAIL, R. F.; GHORBANZADEH, O.; DULEBA, S.; MAQSOOM, A.; BLASCHKE, T. Analyzing the importance of driver behavior criteria related to road safety for different driving cultures. **International Journal of**

Environmental Research and Public Health, [s. l.], v. 17, n. 6, 2020.

FELISONI, P. R.; FELLIPE, S. M.; LIBRANTZ, A. F. H. A Fuzzy AHP Analysis of it Outsourcing Monitoring in Public Organizations. [s. l.], v. 12, p. 48–65, 2022. Disponível em: <http://periodicos.ufpb.br/ojs2/index.php/pgc>.

FELISONI, P.; SILVA MARTINS, F.; LIBRANTZ, A. F. H. A study on knowledge management in IT services outsourcing in public companies using fuzzy-AHP A fuzzy-AHP analysis of IT outsourcing monitoring in public organizations View project Competitiveness for Urban Planning View project. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/355108505>. .

FONTAINE, P.; MINNER, S. Benders decomposition for the Hazmat Transport Network Design Problem. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 267, n. 3, p. 996–1002, 2018.

FUNO, K. A.; JUNIOR, J. M.; MARINS, F. A. S. Risk factors in aerospace supply chain: Qualitative and quantitative aspects. **Producao**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 832–845, 2013.

GENG, X.; LV, Y.; ZHAO, L.; WANG, Y. Measurement and Simulation of Risk Coupling in Port Hazardous Chemical Logistics. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 20, n. 5, 2023.

GUARINO, L. C.; TACIANA, G. C.; ROBERTO R. J. O Método FUZZY AHP Aplicado à Análise de Riscos de Usinas Hidrelétricas em Fase de Construção. [S. l.: s. n.], 2012.

GUL, M.; GUNERI, A. F.; NASIRLI, S. M. A fuzzy-based model for risk assessment of routes in oil transportation. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 16, n. 8, p. 4671–4686, 2019.

GÜLGÜN, F. Road hierarchy with integration of attributes using fuzzy-AHP. **Geocarto International**, [s. l.], v. 29, n. 6, p. 688–708, 2014.

HAFIZ, R. M. 2 A.; AKBAR, A. **Risk factors in transportation of hazardous materials in Iran**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: <http://www.dilemascontemporaneoseducaçãopolíticayvalores.com/>.

HARTMAN, L. C. et al. **Uma metodologia para avaliação de risco no transporte de produtos perigosos por rodovias**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil. Unicamp. 2003.

HOLECZEK, N. Hazardous materials truck transportation problems: A classification and state of the art literature review. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s. l.], v. 69, p. 305–328, 2019.

HUANG, C.; BAI, Y.; LU, L. Hazard Analysis and Quantitative Risk Assessment of Port Operation for Dangerous Goods Container. *Em: IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING*, 2020, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.]: Institute of Physics Publishing, 2020.

HUANG, X.; WEN, Y.; ZHANG, F.; SUI, Z.; CHENG, X. A comprehensive risk assessment framework for inland waterway transportation of dangerous goods. **Journal of Marine Science and Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 8, 2021.

HUANG, W.; ZHANG, Y. Railway Dangerous Goods Transportation System Risk Assessment: An Approach Combining FMEA with Pessimistic-Optimistic Fuzzy Information Axiom Considering Acceptable Risk Coefficient. **IEEE Transactions on Reliability**, [s. l.], v. 70, n. 1, p. 371–388, 2021.

ILICI, S.; GHEORGHIOSU, E.; RUS, D.; JITEA, C. Research in the field of evaluation of anfo explosive preparation installations, Tests and results. **MATEC Web of Conferences**, [s. l.], v. 342, p. 01003, 2021.

JOAQUIM FILHO, J. Identifying electric vehicles batteries technology trends: a prospective study based on patent mining. **Brazilian Journal of Business**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 1595–1613, 2023.

JUNIOR, W.; MARTINS, F. S.; LIBRANTZ, A. F. H. Resistance in Processes of Change in Information Technology. [s. l.], v. 37, n. 3, p. 2021, 2021.

KANJ, H.; FLAUS, J. M. An Agent-based framework for mitigating hazardous materials transport risk. *Em: 2015 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVOLVING AND ADAPTIVE INTELLIGENT SYSTEMS, EAIS 2015*, 2015, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.]: **Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.**, 2015.

KINJO, É. M. Modelagem e Simulação de Redes Bayesianas para o Cálculo de Falha em Sistemas IoT na Saúde. [s. l.], 2021.

KINJO, E. M.; LIBRANTZ, A. F. H.; SOUZA, E. M. de; GALDINO, M. Criticality assessment of the components of IoT system in health using the AHP method. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. e57010212917, 2021.

KUNCYTÉ, R.; LABERGE-NADEAU, C.; CRAINIC, T. G.; READ, J. A. Organization of truck-driver training for the transportation of dangerous goods in Europe and North America Accident Analysis and Prevention. [S. l.: s. n.], 2003. Disponível em: www.woscanada.isihost.com. .

LAKEHAL, A.; TACHI, F. Probabilistic assessment of road risks for improving logistics processes. *Em: MATEC WEB OF CONFERENCES*, 2018, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.]:

EDP Sciences, 2018.

LI, Y. L.; YANG, Q.; CHIN, K. S. A decision support model for risk management of hazardous materials road transportation based on quality function deployment. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s. l.], v. 74, p. 154–173, 2019.

LIEGGIO, M.; RONALDO GRANEMANN, S.; AMBRÓSIO DE SOUZA, O. Aplicabilidades da análise multicritério às problemáticas de decisão no transporte rodoviário de produtos perigosos: uma perspectiva teórica [Applicability of multicriteria analysis to decision problems in road transport of dangerous goods: a theoretical perspective]. **Journal of Transport Literature**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 197–217, 2012. Disponível em: www.transport-literature.org.

LIPSCHUTZ, S., & LIPSON, M. L. **Algebra linear** (4a ed.). São Paulo: Bookman, 2011.

LIU, L.; LI, J.; ZHOU, L.; FAN, T.; LI, S. Research on route optimization of hazardous materials transportation considering risk equity. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 13, n. 16, 2021.

LOPES, C. A. Gestão de Risco no Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos – Classe 1 (Explosivos). **UNINOVE**, [s. l.], p. 1–133, 2019.

LUNDIN, J. Risk Evaluation and Risk Control in Road Overbuilding of Transport Routes for Dangerous Goods. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, [s. l.], v. 12, n. 6, 2018.

MA, X.; XING, Y.; LU, J. Causation Analysis of Hazardous Material Road Transportation Accidents by Bayesian Network Using Genie. **Journal of Advanced Transportation**, [s. l.], v. 2018, 2018.

MA, Y.; XU, J.; GAO, C.; MU, M.; GUANGXUN, E.; GU, C. **Review of Research on Road Traffic Operation Risk Prevention and Control**. [S. l.]: MDPI, 2022.

MACHADO, E. R.; DO VALLE JUNIOR, R. F.; PISSARRA, T. C. T.; SIQUEIRA, H. E.; FERNANDES, L. F. S.; PACHECO, F. A. L. Diagnosis on transport risk based on a combined assessment of road accidents and watershed vulnerability to spills of hazardous substances. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 15, n. 9, 2018.

MADEJ, M.; PAJAK, M. Road transport of dangerous goods in Poland – Risk analysis. [s. l.], v. 31, 2019.

MARQUES, J. B. V.; FREITAS, D. de. Método DELPHI: caracterização e potencialidades na pesquisa em Educação. **Pro-Posições**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 389–

415, 2018a.

MARCONI, M.A.; LAKATOS, E.M. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MARQUES, J. B. V.; FREITAS, D. de. Método DELPHI: caracterização e potencialidades na pesquisa em Educação. **Pro-Posições**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 389–415, 2018b.

MARTINS, L. S. Reciclagem de baterias de veículos elétricos: Obtenção dos metais a partir de um processo hidro metalúrgico utilizando ácidos orgânicos. [S. l.: s. n.], 2022.

MESQUITA FEITOZA, T.; ALVES JUNIOR, J. Uma Análise Sobre o Uso Criminoso de Explosivos no Brasil de 2013 a 2017: O Estado do Amazonas em Perspectiva. [S. l.: s. n.], 2020.

MOHAMMADFAM, I.; KALATPOUR, O.; GHOLAMIZADEH, K. Quantitative Assessment of Safety and Health Risks in HAZMAT Road Transport Using a Hybrid Approach: A Case Study in Tehran. **ACS Chemical Health and Safety**, [s. l.], v. 27, n. 4, p. 240–250, 2020.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. [S. l.: s. n.], 2009.

MUNARETTI, E. Desenvolvimento e Avaliação de Desempenho de Misturas Explosivas a Base de Nitrato de Amônio e Óleo Combustível. [S. l.: s. n.], 2002.

NOVAES, R.; ONIAS, T.; VILELA, A.; TOLEDO HERNANDEZ, C. Aplicação do Método AHP para Auxílio à Tomada de Decisão para Gestores na Escolha do Tipo de Embalagem no Desenvolvimento de Novas Peças no Setor Automobilístico. [S. l.: s. n.], 2008.

OLIVEIRA, J. C. DE; LIBRANTZ, A. F. H.; NETO, G. C. D. O. Aplicação do Método AHP para seleção de provedores de serviços logísticos de transporte para o setor de cargas expressas. [s. l.], 2017.

OLIVEIRA, M.; RIBAS, R. Aplicação da Metodologia FUZZY AHP na Análise de Riscos da AHE Simplício Queda Única [S. l.: s. n.], 2014.

ONU. **Recommendation on the Transport of Dangerous Goods – Model Regulations**. United Nations – UN, 15th rev. ed. New York and Geneva, 2013.

PATEL, P.; SOHANI, N. System safety assessment based on past incidents in oil and gas industries: A focused approach in forecasting of minor, severe, critical, and catastrophic incidents, 2010-2015. **Advances in Materials Science and**

Engineering, [s. l.], v. 2016, 2016.

PEZZULLO, LUCA & FILIPPO, ROBERTO. (2009). Perceptions of industrial risk and emergency management procedures in Hazmat Logistics: A qualitative mental model approach. **Safety Science - SAF SCI**. 47. 537-541. 10.1016/j.ssci.2008.07.006.

RADA, E. C.; FERRONATO, N.; TORRETTA, V. Individual risk evaluation and interventions for mitigation in the transportation of hazardous goods: A case study. *Em: MATEC WEB OF CONFERENCES*, 2017, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.]: EDP Sciences, 2017.

REN, C.; YUAN, X.; WANG, J.; ZHANG, X.; LI, J. Study on emergency response rank mode of flammable and explosive hazardous materials road transportation. *Em: PROCEDIA ENGINEERING*, 2012, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2012. p. 830–835.

ROMEU, F.; BRUNSTEIN, I.; MINORO ABE, J. Um Estudo de Tomada de Decisão Baseado em Lógica Paraconsistente Anotada: Avaliação do Projeto de uma Fábrica Artificial Intelligence etc. [S. l.: s. n.], 1997.

ROSENGREN, L. Preliminary Analysis of the Dynamic Interaction Between Norra Linken and a Subway Tunnel for Stockholm, Sweden. [S. l.: s. n.], 1993.

ROWE, G.; WRIGHT, G. The Delphi Technique: Past, Present, and Future Prospects – Introduction to the Special Issue. **Technological Forecasting and Social Change**, v.78, ed.9, p.1487–1490, 2011

RUSSO, F.; RINDONE, C. Risk occurrence measures for dangerous goods a road network goods transport on. [s. l.], 2013. Disponível em: www.witpress.com,.

SAATY. Axiomatic foundation analytic. **MANGEMENT SCIENCE**, [s. l.], v. 7, 1986.

SAATY, T. L. Decision Aiding Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. [S. l.: s. n.], 2003. Disponível em: www.elsevier.com/locate/dsw. .

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process Int. **J. Services Sciences**. [S. l.: s. n.], 2008.

SAATY. How Make Decision. [s. l.], 1994.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes for The Measurement of Intangible Criteria and for Decision - Making**. [S. l.: s. n.], 2016.

SAATY, T. L.; HU, G. Ranking by Eigenvector Versus Other Methods in the Analytic Hierarchy Process Appl. **Math. Lett.** [S. l.: s. n.], 1998.

SAATY, T. L.; KATZ, J. M. **How to make a decision: The Analytic Hierarchy**

Process European Journal of Operational Research. [S. l.: s. n.], 1990.

SANTIS, S. H. da silva; MARCIANO, J. P. P. Criteria for carriage of dangerous cargo class 1 – explosives in Brazil. **Int. J. Logistics Systems and Management**. [S. l.: s. n.], 2020.

SANTOS, N. O.; KAWAMOTO JUNIOR, L. T.; CARDOSO, H.; BONINI, L. M. de M. Health and working conditions of truck drivers in Brazil. **Independent Journal of Management & Production**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 1036, 2019.

SANTOS, A. R. F.; RODRIGUES, A. A.; RABELO, R.; ABE, J. M.; SOUSA, N. C.; SOBRAL, J. V. V.; BUONAFINA, M. A. M. Uma Análise do Protocolo de Roteamento RPL Baseadas na Lógica Paraconsistente para Internet das Coisas. [S. l.: s. n.], 2017.

SANTOS, H. H.; SIQUEIRA, R. M. Analytic Hierarchy Process, Analytic Network Process e FUZZY AHP: Um estudo Comparativo entre os Métodos. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/321884233>.

SARTORI, H.; CORDEIRO, C. C. M. Leis e Diretrizes para o Transporte Terrestre de Cargas Perigosas no Brasil. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [s. l.], v. 7, n. 11, p. 782–791, 2021.

ŞENCAN, M.; YAVUZ, H. Transportation of Dangerous Goods: Turkey Model **Journal of International Trade, Logistics and Law**. [S. l.: s. n.], 2017.

SILVA, F. C.; SHIBAO, F. Y.; LIBRANTZ, A. F. H.; SANTOS, M. R.; OLIVEIRA NETO, G. C. Perspectiva de aplicação do método Analytic Hierarchy Process no cenário brasileiro de pesquisa. **Revista Organizações em Contexto**, [s. l.], v. 16, n. 32, p. 95–124, 2020.

SADEROVA, J., ROSOVA, A., KACMARY, P., *et al.* "Modelling as a tool for the planning of the transport system performance in the conditions of a raw material mining", **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 19, p. 1–17, 2020. DOI: 10.3390/su12198051.

TANACKOV, I.; JANKOVIĆ, Z.; SREMAC, S.; MILIČIĆ, M.; VASILJEVIĆ, M.; MIHALJEV-MARTINOV, J.; ŠKILJAICA, I. Risk distribution of dangerous goods in logistics subsystems. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, [s. l.], v. 54, p. 373–383, 2018.

TASLIMI, M.; BATTI, R.; KWON, C. A comprehensive modeling framework for hazmat network design, hazmat response team location, and equity of risk. **Computers and Operations Research**, [s. l.], v. 79, p. 119–130, 2017.

TATARINOV, V.; KIRSANOV, A. Enhancement of monitoring systems for the transport

of dangerous goods by road. *Em: IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING*, 2019, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.]: Institute of Physics Publishing, 2019.

TELES, H. O Uso de Redes Bayesianas para Modelagem e Simulação dos fatores de Risco no Transporte de Cargas [S. l.: s. n.], 2020.

TORRETTA, V.; RADA, E. C.; SCHIAVON, M.; VIOTTI, P. Decision support systems for assessing risks involved in transporting hazardous materials: A review. [S. l.]: Elsevier B.V., 2017.

WALENDZIK, M.; KAMIŃSKI, T.; PAWLAK, P.; DEMESTICHAS, K. The Analysis of Organizational and Legal Possibilities to Reduce the Dangers Related to Road Transport of Dangerous Goods in Poland. **Journal of KONBiN**, [s. l.], v. 51, n. 1, p. 15–28, 2021.

XIA, Y.; MA, F.; LIAO, H.; LIAO, Z. Study on Features of Hazardous Goods Transport Accidents on Highway. *Em: IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING*, 2020, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.]: Institute of Physics Publishing, 2020.

XING, Y.; CHEN, S.; ZHU, S.; ZHANG, Y.; LU, J. Exploring risk factors contributing to the severity of hazardous material transportation accidents in China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 17, n. 4, 2020.

YANG, Q.; CHIN, K. S.; LI, Y. L. A quality function deployment-based framework for the risk management of hazardous material transportation process. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, [s. l.], v. 52, p. 81–92, 2018a.

YANG, Q.; CHIN, K. S.; LI, Y. L. A quality function deployment-based framework for the risk management of hazardous material transportation process. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, [s. l.], v. 52, p. 81–92, 2018b.

YANG, M.; KHAN, F. I.; SADIQ, R. Prioritization of environmental issues in offshore oil and gas operations: A hybrid approach using fuzzy inference system and fuzzy analytic hierarchy process. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 89, n. 1, p. 22–34, 2011.

YU, S.; LI, Yi; XUAN, Z.; LI, Yishun; LI, G. Real-Time Risk Assessment for Road Transportation of Hazardous Materials Based on GRU-DNN with Multimodal Feature Embedding. **Applied Sciences (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 21, 2022.

ZADEH, L. Fuzzy Sets. [s. l.], 1965.

ZHANG, C. Analysis of Fire Safety System for Storage Enterprises of Dangerous

Chemicals. *Em: PROCEA ENGINEERING*, 2018, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2018. p. 986–995.

ZHANG, W.; CHENG, W.; GAI, W. Hazardous Chemicals Road Transportation Accidents and the Corresponding Evacuation Events from 2012 to 2020 in China: A Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 19, n. 22, 2022.

ZHOU, K.; XIAO, L.; LIN, Y.; YUAN, D.; WANG, J. A Statistical Analysis of Hazardous Chemical Fatalities (HCFs) in China between 2015 and 2021. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 14, n. 4, 2022.

APÊNDICE

Questionário sobre a Utilização do Método Fuzzy AHP

Caro Participante, este questionário tem como objetivo avaliar sua experiência e percepções em relação à utilização do método Fuzzy AHP na tomada de decisões. Suas respostas são valiosas e contribuirão para entendermos melhor o impacto e a eficácia desse método. Por favor, responda com sinceridade com base em suas experiências.

1. Em que medida o método Fuzzy AHP tem sido útil na hierarquização de critérios para suas decisões?

- 1 - Muito Pouco Útil
- 2 - Pouco Útil
- 3 - Moderadamente Útil
- 4 - Muito Útil
- 5 - Extremamente Útil

2. Como você avalia a capacidade do Fuzzy AHP em lidar com a incerteza e imprecisão nas comparações entre critérios?

- 1 - Muito Ineficiente
- 2 - Ineficiente
- 3 - Moderadamente Eficiente
- 4 - Eficiente
- 5 - Altamente Eficiente

3. Na sua experiência, o Fuzzy AHP facilitou a integração das preferências individuais dos membros da equipe na tomada de decisões em grupo?

- 1 - Discordo Totalmente
- 2 - Discordo
- 3 - Neutro

4 - Concordo

5 - Concordo Totalmente

4. O método Fuzzy AHP proporcionou resultados consistentes em diferentes situações de tomada de decisão em que você o utilizou?

1 - Raramente Consistente

2 - Ocasionalmente Consistente

3 - Moderadamente Consistente

4 - Geralmente Consistente

5 - Sempre Consistente

5. Considerando a complexidade das suas decisões, como você avalia a praticidade e a aplicabilidade do Fuzzy AHP?

1 - Pouco Prático e Aplicável

2 - Moderadamente Prático e Aplicável

3 - Praticável

4 - Muito Prático e Aplicável

5 - Extremamente Prático e Aplicável

Pergunta Dissertativa:

6. Quais desafios ou limitações você identificou ao utilizar o Fuzzy AHP, e como esses desafios foram abordados?

Obrigado por sua participação! Suas respostas são fundamentais para melhorar a compreensão sobre a aplicação prática do método Fuzzy AHP.