

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PROPOSTA DE UMA AVALIAÇÃO DE RISCO
MULTIDIMENSIONAL EM SISTEMA DE TRANSPORTE
FERROVIÁRIO DE PRODUTOS PERIGOSOS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UFPE
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE
POR

MAYCON TEIXEIRA MINUCELLI
Orientador: Prof. Dr. Thalles Vitelli Garcez

CARUARU – 2017

MAYCON TEIXEIRA MINUCELLI

**PROPOSTA DE UMA AVALIAÇÃO DE RISCO
MULTIDIMENSIONAL EM SISTEMAS DE TRANSPORTE
FERROVIÁRIO DE PRODUTOS PERIGOSOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção de Mestre em Engenharia de Produção. (Área de Concentração: Otimização e Gestão da Produção).

Orientador: Prof. Drº Thalles Vitelli Garcez.

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva CRB/4 – 1223

M668p

Minucelli, Maycon Teixeira.

Proposta de uma avaliação de risco multidimensional em sistema de transporte ferroviário de produtos perigosos. / Maycon Teixeira Minucelli. - 2017.
75f.: il.; 30 cm.

Orientador: Thalles Vitelli Garcez.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2017.
Inclui Referências.

1. Transporte ferroviário – Brasil. 2. Avaliação de riscos – Brasil. 3. Logística.
I. Thalles, Vitelli Garcez (Orientador). II. Título.

658.5 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 2017-068)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA PARECER DA COMISSÃO
EXAMINADORA PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORAPARECER
DA COMISSÃO EXAMINADORADA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE**

MAYCON TEIXEIRA MINUCELLI

**“Proposta de uma Avaliação de Risco Multidimensional em
Sistemas de Transporte Ferroviário de Produtos Perigosos”**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Otimização e Gestão da Produção

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o candidato MAYCON TEIXEIRA MINUCELLI **APROVADO**.

Caruaru, 30 de Março de 2017.

Prof. THALLES VITELLI GARCEZ, Dr. (UFPE)

Prof.^a. MARCELE ELISA FONTANA, Dr. (UFPE)

Prof. RODRIGO JOSÉ PIRES FERREIRA, Dr. (UFPE)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre estar presente em minha vida. À minha família, principalmente minha mãe Elisete e meu pai Nelson, que sempre me deram forças para que eu não desistisse dos meus objetivos de vida. Aos meus amigos que sempre torceram pelo meu melhor.

Agradeço ao orientador Profº Dr. Thalles Vitelli Garcez, pela orientação em todo o processo do trabalho compartilhando seu conhecimento. Sou grato a todos os professores que me conduziram nesse processo de aprendizado durante o curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco.

Agradeço também, aos participantes do Grupo de Pesquisa em Risco e Análise de Decisão em Operações e Manutenção – RANDOM pelo companheirismo e união deste grupo do qual fiz parte.

Por fim, agradeço a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco – FACEPE (PBPG 05343.08/14) pelo apoio dado, pois sem este apoio não seria possível dar andamento ao trabalho aqui apresentado.

RESUMO

Embora o transporte ferroviário seja considerado seguro, com a movimentação de produtos perigosos, acidentes ocorrem e podem impactar negativamente os seres humanos, o meio ambiente e as empresas transportadoras. Metodologias tradicionais de avaliação de risco normalmente tratam apenas de uma dimensão de risco, impactos sobre os seres humanos, sendo insuficientemente ampla por não refletir a magnitude da realidade dos cenários acidentais. Neste contexto, o presente trabalho explora a avaliação sob uma visão multidimensional do risco em sistemas de transporte ferroviário, caracterizando as várias dimensões de consequências encontradas na literatura e propondo um modelo de avaliação de risco utilizando-se a Teoria da Utilidade Multiatributo – MAUT, com o objetivo de auxiliar o decisor no processo de gerenciamento de risco. Além disso, o modelo permite incorporar as preferências do decisor e incertezas decorrentes dos cenários acidentais, bem como a inclusão das dimensões de consequências humanas, ambientais e financeiras, acrescentando a dimensão de consequência relacionada a cadeia logística, não considerada em estudos anteriores. O modelo proposto permite ao decisor fazer uma análise aprofundada da segmentação da linha ferroviária em forma de uma hierarquia de risco, com a possibilidade de alocar os recursos necessários para a prevenção e mitigação dos riscos conforme aqueles que possuem os maiores valores de risco. Desta forma, torna-se uma importante ferramenta de decisão contribuindo para o gerenciamento de risco no contexto ferroviário como um todo.

Palavras-chave: Transporte ferroviário. Risco multidimensional. MAUT. Cadeia logística.

ABSTRACT

Although rail transport is considered to be safe, carrying dangerous products may cause accidents and negatively impact human beings, the environment and transport undertakings. Traditional methodologies for risk assessment typically treat only one dimension of the risk, impacts on human beings, not being sufficiently broad to reflect the magnitude of the scenarios reality. In this context, this paper explores the assessment under a multidimensional vision of risk in railway systems, featuring the various dimensions of consequences found in literature and proposing a model of risk assessment using the Multiattribute utility theory-MAUT, aiming to support the decision maker in the risk management process. In addition, the model allows to the incorporation of the decision-maker's preferences and uncertainties arising from accidental scenarios, as well as the inclusion of the dimensions of human, environmental and financial consequences, adding the dimension of consequence relative to the logistics chain, not considered in previous studies. The proposed model allows the decision maker to make a deep analysis of the railway line's segmentation in the form of a risk hierarchy, with the possibility of allocating the necessary resources for prevention and mitigation of risks prioritizing those that have the highest values. In this way, it becomes an important decision-making tool contributing to risk management in the rail context as a whole.

Keywords: Rail transport. Multidimensional risk. MAUT. Logistics chain.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Processo de análise de risco	17
Figura 2.2 – Metodologias de avaliação e análise de risco	19
Figura 2.3 - Estrutura Hierárquica para mais de dois atributos	26
Figura 3.2 - Acidentes ferroviários entre 2006-2013	36
Figura 3.3 - Principais causas dos acidentes ferroviários envolvendo produtos perigosos	40
Figura 4.1- Estrutura hierárquica das dimensões de consequências.....	44
Figura 4.2 - Estrutura do modelo de decisão	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Acidentes por tipo de atividade	38
Tabela 3.2 - Principais produtos transportados pelas ferrovias segundo a CETESB/SP	39

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Principais decretos e resoluções que regem o transporte ferroviário	33
Quadro 3.2 - Classificação dos produtos perigosos conforme a Resolução 420 da ANTT	34
Quadro 3.3 - Principais normas regulamentadoras.....	35
Quadro 3.4 - Descrição dos acidentes ferroviários e suas consequências	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Relevância e Contribuição na Realização do Estudo	13
1.2	Objetivos Gerais e Específicos	14
1.3	Estrutura do Trabalho	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Conceitos em Gerenciamento de Risco	16
2.1.1	Principais Metodologias Aplicadas no Gerenciamento de Risco	18
2.1.2	Técnicas Qualitativas	19
2.1.3	Técnicas Quantitativas	20
2.1.4	Técnicas Híbridas	22
2.2	Apoio à Decisão Multicritério	23
2.2.1	Teoria da Utilidade Multiatributo – MAUT	25
3	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	27
3.1	Breve Histórico das Ferrovias Brasileiras	27
3.1.1	Principais Características Técnicas e Econômicas do Modal Ferroviário	27
3.2	Gerenciamento de Risco no Transporte de Produtos Perigosos	29
3.3	Regulamentação para o Transporte de Produtos Perigosos	31
3.3.1	Principais Leis e Normas Regulamentadoras Brasileiras	31
3.3.2	Acidentes Ferroviários com Produtos Perigosos no Brasil	36
4	AVALIAÇÃO DE RISCO MULTIDIMENSIONAL	42
4.1	Introdução ao Risco Multidimensional	42
4.2	Caracterização do Risco Multidimensional	43
4.2.1	Dimensão de Consequências Humanas	45
4.2.2	Dimensão de Consequências Ambientais	47
4.2.3	Dimensão de Consequências Financeiras	48
4.2.4	Dimensão de Consequências Logísticas	51
4.3	Proposta de Modelo de Avaliação Risco Multidimensional	54
4.3.1	Identificação do Decisor	55
4.3.2	Identificação dos Cenários	55
4.3.3	Seleção das Alternativas	56

4.3.4	Determinação das Probabilidades de Ocorrência dos Cenários	57
4.3.5	Estimação da Área de Impacto	57
4.3.6	Determinação do Conjunto de <i>Payoffs</i>	58
4.3.7	Elicitação da Função Utilidade	59
4.3.8	Cálculo do Valor do Risco	61
4.3.9	<i>Ranking</i> do Risco e Tratamento do Risco	62
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	63
-	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Com o processo de concessão das ferrovias brasileiras iniciado em 1996 deu um novo impulso no setor. De acordo com Associação Nacional Transportes Ferroviários (2013), a movimentação de cargas pelas ferrovias cresceu 90%, comparando com a realizada de 1997 com 2012, passando de 253,3 para 481,2 milhões de toneladas úteis. Contudo, quando comparado com outros modais de transporte, as ferrovias movimentam apenas 20% da do transporte de carga do Brasil (CNT, 2015).

Entretanto, segundo Geyger (2015), o papel de coadjuvante dos trilhos brasileiros no setor pode ser alterado nos próximos anos, pois até 2018, o Governo Federal pretende construir 12 novos trechos ferroviários no país e fazer com que haja uma maior utilização das ferrovias para o transporte de cargas perigosas. Desta forma, aposta-se no crescimento do volume transportado.

Para Verma & Verter (2010), o crescimento do transporte ferroviário, sobretudo de materiais perigosos, é atribuído às pressões competitivas em cadeias globais de suprimentos, a crescente demanda por novos padrões de serviço, bem como a globalização da indústria. Este crescimento fez com que houvesse uma necessidade em gerenciar os riscos que esta atividade pode acarretar, sobretudo quanto a movimentação de produtos perigosos, onde quantidade significativa de vagões que transportam materiais perigosos, em caso de acidente, pode envolver vários vagões, com potencial de liberar grande quantidade de conteúdo e grande impacto sobre a saúde humana, as propriedades e o meio ambiente (LIU; SAAT; BARKAN, 2014).

De acordo com Zografos (2000), para que se reduzam os riscos associados ao transporte de produtos perigosos é importante que se desenvolvam sistemas de gestão de riscos através do levantamento de informações e procedimentos para apoiar decisões estratégicas, táticas e operacionais, que visem tanto a redução da probabilidade de ocorrência de acidentes, quanto a redução da magnitude das consequências de um acidente.

Um gerenciamento de risco mais eficiente pode ser conseguido em abordagens que englobam uma análise conjunta dos riscos, ou seja, quando é considerada apenas uma dimensão de risco para que seja feita uma avaliação, seja ela humana, ambiental, financeira ou logística, pode não refletir a realidade do contexto que está sendo estudado, sendo preciso considerar as várias consequências decorrentes de um acidente. Então, cada vez mais, segundo Vilko & Hallikas (2012), gerentes em todo mundo estão selecionando estratégias de

gestão de risco que visam uma abordagem em um contexto mais amplo, como, por exemplo, os Métodos de Apoio a Decisão Multicritério (MCDM - *Multiple Criteria Decision Making*), que dão suporte para que decisores englobem vários critérios e objetivos que pretendem alcançar de acordo com suas preferências (de ALMEIDA *et al.* 2015).

1.1 Relevância e Contribuição na Realização do Estudo

O transporte de produtos perigosos traz consigo uma série de incertezas e riscos potenciais, tais como acidentes, explosões, contaminação e poluição causada pela liberação dos produtos perigosos, o uso excessivo de infraestruturas rodoviárias, ferroviárias ou portuárias etc. Mesmo pequenos incidentes podem fazer com que atraia a atenção do público em geral e indústrias, como também, a classe política, dos quais devem estar cientes dos riscos gerados pelo transporte de produtos perigosos.

Neste contexto, o transporte ferroviário de produtos perigosos é parte crítica deste processo por transportar grandes quantidades. Mesmo que, segundo Oggero *et al.* (2006), a estatística de segurança seja favorável às ferrovias, acidentes causados por esse tipo de modal pode trazer altas consequências para a população e meio ambiente dada as suas propriedades químicas, o que vem a potencializar a gravidade dos acidentes ocorridos.

Sendo assim, partes interessadas, sejam elas públicas e privadas, estão de acordo sobre a necessidade de que o transporte de produtos perigosos através do modal ferroviário seja de maneira segura e deve ser organizada de forma tão eficiente quanto possível.

De acordo com Liu *et al.* (2014), a consequência de uma liberação de materiais perigosos pode ser expressa usando várias dimensões, dentre elas está o impacto humano (por exemplo, o número de pessoas potencialmente afetadas por um lançamento), sendo esta, segundo Lins & de Almeida (2012), a dimensão com maior abordagem na literatura relacionada ao risco de transporte de produtos perigosos.

Autores como Brito & de Almeida (2009), Alencar & de Almeida (2010), Lins & de Almeida (2012) e Garcez & de Almeida (2014), já abordaram anteriormente a necessidade de se fazer uma análise das consequências de forma multidimensional, das quais utilizaram as dimensões de consequência humana, ambiental e financeira e operacional.

No entanto, estas não são as únicas consequências a serem consideradas, no contexto de transporte ferroviário de produtos perigosos, a cadeia logística também sofre as consequências em caso de acidentes, tais como a interrupção do fluxo de materiais, atrasos na entrega e a perda de clientes devido a percepção de insegurança por parte dos mesmos e população,

afetando-as estrategicamente, entre outras consequências. É preciso que a dimensão de consequência logística seja incorporada à outras dimensões de consequência para uma avaliação de risco em sistemas de transportes, pois será possível a consideração de aspectos próprios do contexto de transporte ferroviário. A consideração de uma nova dimensão de consequência e a proposição de um modelo de avaliação multidimensional para o contexto ferroviário são as principais contribuições deste trabalho, uma vez que não foi verificada na literatura pesquisada.

1.2 Objetivos Gerais e Específicos

Esse trabalho tem como objetivo caracterizar e propor um modelo de avaliação de risco multidimensional em sistema de transporte ferroviário de produtos perigosos.

Para a realização deste trabalho e alcance do objetivo geral, é necessário o desenvolvimento dos seguintes objetivos específicos:

1. Fazer uma breve revisão conceitual sobre os temas relacionados ao estudo, tais como: o conceito e o processo de avaliação de riscos, os principais métodos utilizados, apoio multicritério à decisão e a teoria da utilidade multiatributo.
2. Contextualizar o transporte ferroviário para o transporte de produtos perigosos.
3. Identificar e caracterizar a visão multidimensional do risco e as formas com que o risco multidimensional pode ser tratado no contexto de ferrovias e assim, considerá-las na proposição do modelo;
4. Por fim, descrever e apresentar as etapas necessárias para o desenvolvimento do modelo proposto neste trabalho, através do método MAUT.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em 5 capítulos. O Capítulo 1 traz uma breve introdução ao tema e apresenta os objetivos – geral e específico – que o trabalho busca alcançar, assim como as principais contribuições e relevâncias do trabalho para a comunidade acadêmica e sociedade em geral.

O Capítulo 2 apresenta o Referencial Teórico sobre Análise de Risco, demonstrando os principais conceitos e metodologias de avaliação de risco, apoio a decisão multicritério e multiatributo.

No Capítulo 3, realiza-se a contextualização do problema de pesquisa acerca do transporte ferroviário de produtos perigosos, e como se dá o gerenciamento de risco na realização deste tipo de atividade através de metodologias e leis regulamentadoras.

O Capítulo 4 caracteriza as dimensões de consequências na visão multidimensional e descreve como o risco multidimensional pode ser tratado através de algumas metodologias. É apresentado também, o modelo proposto baseado na teoria de utilidade multiatributo sob uma visão multidimensional das consequências e a descrição de cada uma das etapas para o problema em questão.

Na última etapa do trabalho, são apresentadas as considerações do trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Adaptações de análise de risco por muitas disciplinas, juntamente com sua implantação pela indústria e agências governamentais na tomada de decisões, têm levado a um desenvolvimento de teorias, metodologias e ferramentas práticas. O presente capítulo tem como objetivo demonstrar as principais teorias e metodologias aplicadas ao gerenciamento de risco.

2.1 Conceitos em Gerenciamento de Risco

Gestão de risco é definido como todas as medidas e atividades realizadas para gerenciar o risco, lida também, com equilíbrio e conflitos inerentes em explorar oportunidades de um lado e evitar perdas, acidentes e catástrofes do outro (AVEN, 2008).

Byrd & Cothorn (2000) definem risco como “a probabilidade de uma perda futura”. O risco ainda pode ser definido como a possibilidade de sofrer danos causados por um perigo (COHRSEN & COVELLO, 1999). Em geral, “perigo” deve ser definido como um atributo de substâncias ou de processos, que podem potencialmente causar danos (HØJ & KRÖGER, 2002).

A definição de risco pode ir além da probabilidade de perda futura ou a ocorrência de danos dada a existência de uma fonte de perigo. Para Aven (2010), a definição de risco admite ser interpretada de várias maneiras, pois existem vários tipos de riscos como, por exemplo, risco de mercado, risco de crédito, risco de liquidez, risco operacional, risco legal e risco do fator humano. Cada um desses riscos possui diferentes interpretações. Aven (2011) acrescenta ainda que o risco pode ser visto como um trio composto por cenário, consequências e probabilidades, onde essas probabilidades representam as incertezas de ocorrências de determinados eventos.

Portanto, o risco está relacionado a eventos futuros A e suas consequências (resultados) C . No presente, não se sabe se esses eventos irão ocorrer ou não, e se eles ocorrerem, quais serão as consequências. Em outras palavras, há a presença da incerteza U ambos associado ao A e à C . Quão provável é que um evento A ocorrer e que irão resultar consequências específicas, pode ser expressa por meio de probabilidades P , baseado em conhecimento do especialistas, denotado por K (AVEN, 2008). A incerteza U refere-se simplesmente ao fato de A e C serem desconhecidos e, por conseguinte, incerta e o grau de incerteza depende do conhecimento do especialista e, portanto, é subjetiva em geral (AVEN, 2010).

No presente trabalho, o risco será considerado como um produto do cenário, suas consequências, onde há um contexto de incerteza associados, com base nas definições de Aven (2008) e Aven (2010), uma vez que há o interesse em conhecer as possíveis consequências, os possíveis cenários para que então seja feita a avaliação do risco.

O gerenciamento de risco, de acordo com Carpenter (1995), pode ser definido com uma ferramenta que utiliza os resultados provenientes da avaliação de riscos com o objetivo de diminuir as chances e as consequências do risco. O processo de análise de risco é uma parte central da gestão de riscos e tem uma estrutura básica que é independente da sua área de aplicação (AVEN, 2015). Existem várias maneiras de apresentar o processo de análise de risco, mas a maioria das estruturas contém três elementos-chaves, conforme mostrado na Figura 2.1.

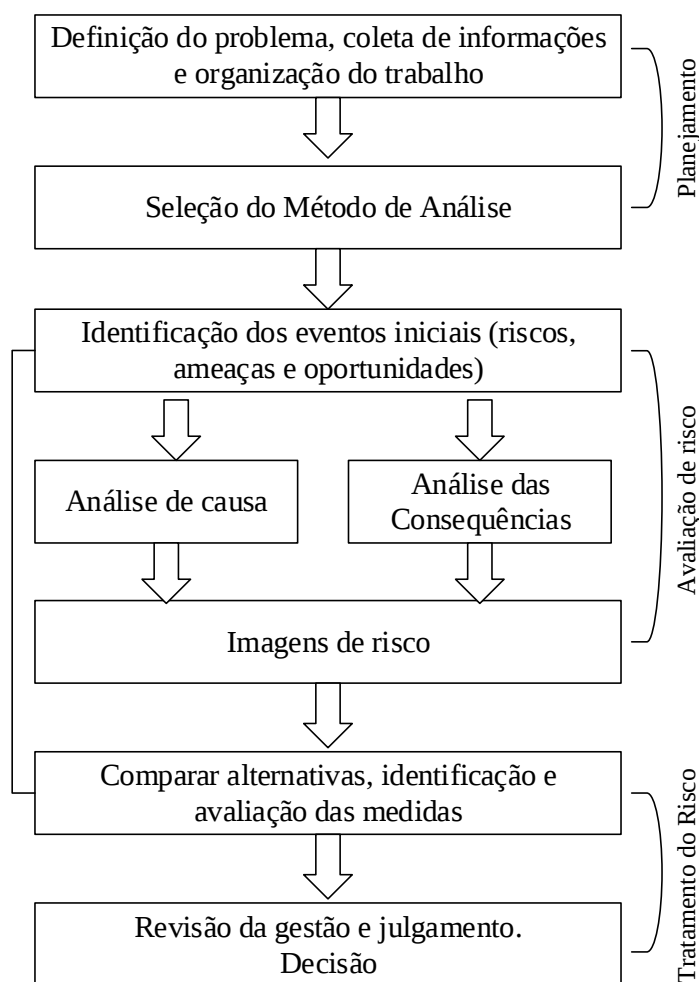


Figura 2.1- Processo de análise de risco

Fonte: Adaptado de Aven (2015).

O planejamento envolve a discussão entre tomadores de decisão e as partes interessadas para estabelecer questões a serem avaliadas, os objetivos e a abrangência na qual vai ser realizado o estudo, para que se possa formular o problema, no qual, envolve o desenvolvimento de um modelo conceitual e plano de análise para a avaliação e procede-se em paralelo com o planejamento e escopo (ABT *et al.* 2010).

Avaliação de risco descreve as tarefas de identificar e explorar (de preferência em termos quantitativos), os tipos, intensidades e probabilidade das consequências (normalmente indesejáveis) relacionados com um risco ou uma ameaça, por conseguinte, a avaliação dos riscos pode ser definida como uma ferramenta para ganhar conhecimento sobre possíveis acontecimentos e suas consequências e situa-se principalmente na área científica (AVEN & RENN, 2012).

Avaliação de riscos é seguida pelo tratamento de risco, que é o processo e a implementação de medidas destinadas a modificar o risco, incluindo medidas destinadas a evitar, reduzir ("otimizar"), transferir ou reter o risco. Transferência de risco significa compartilhar com outra parte do benefício ou prejuízo associado com um risco (KOBACZY & MURTHY, 2008).

2.1.1 Principais Metodologias Aplicadas no Gerenciamento de Risco

A metodologia de análise de risco não significa necessariamente conter as três fases. Ele pode ser constituído por apenas as seguintes combinações: uma fase de identificação; fases de identificação e avaliação; ou fases de identificação, avaliação e hierarquização. Quaisquer que sejam as metodologias utilizadas, para realizar uma análise de risco, três tipos de elementos são necessários: os dados de saída esperada; dados de entrada disponíveis; e o método selecionado. Na verdade, os usuários propõem alguns objetivos a atingir (dados de saída esperados), ao lado eles coletam informações sobre o sistema estudado (dados de entrada), e, finalmente, escolher o método aplicado de acordo com os dois elementos anteriores (TIXIER *et al.* 2002).

Por meio de uma revisão da literatura, Marhaviolas *et al.* (2011) classificaram a análise de risco e avaliação de técnicas em três categorias principais: qualitativa, quantitativo e as técnicas híbridas (qualitativo-quantitativa, semi-quantitativa). Técnicas qualitativas são baseadas tanto em processos de estimativa analítica e sobre a capacidade de gerentes. De acordo com técnicas quantitativas, o risco pode ser considerado como uma quantidade, que pode ser estimada e expressa por uma relação matemática, sob a ajuda de dados dos acidentes reais gravadas em um local de trabalho. As técnicas híbridas, apresentam uma grande

complexidade devido ao seu caráter *ad-hoc* que impede uma ampla difusão (MARHAVILAS *et al.* 2011). A Figura 2.2 ilustra a classificação de algumas metodologias de análise e avaliação de risco.

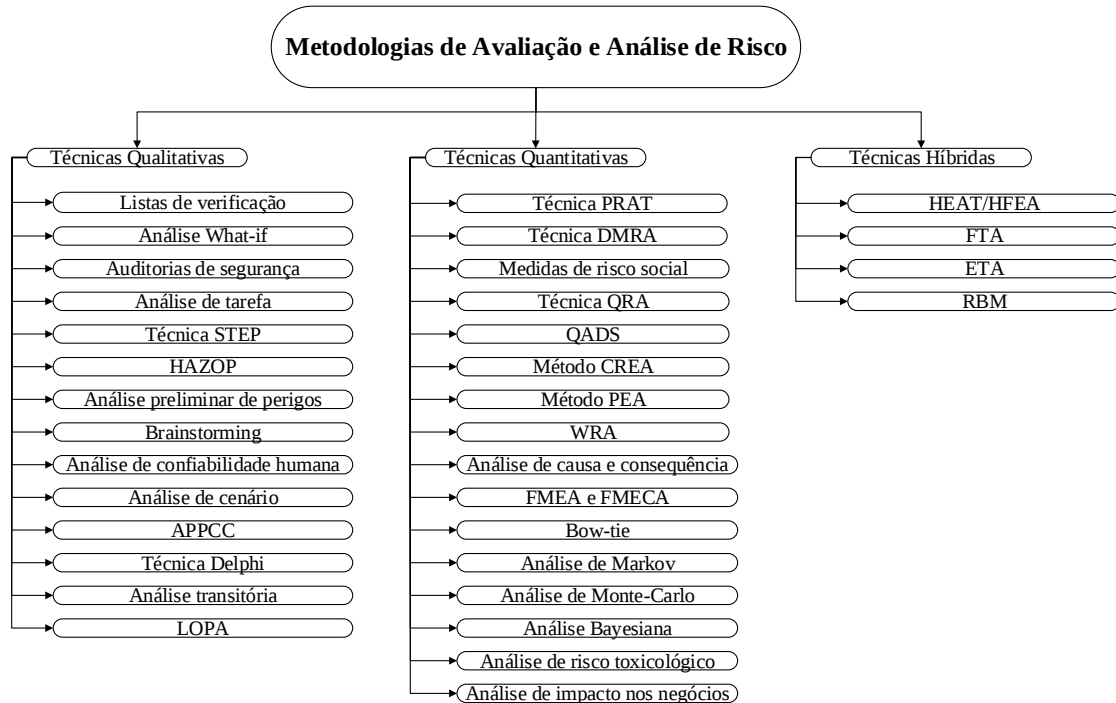


Figura 2.2 – Metodologias de avaliação e análise de risco

Fonte: Adaptado de Marhavilas *et al.* (2011)

2.1.2 Técnicas Qualitativas

Como técnicas qualitativas podem-se citar: Listas de Verificação (*checklist*), análise *What-if*, auditorias de segurança, técnica STEP e HAZOP.

- **Listas de Verificação:** O primeiro método é considerado o mais simples utilizado para a identificação de perigos, e a sua eficácia depende da experiência do analista em questão (RENIERS *et al.* 2005). Uma lista de verificação é uma avaliação sistemática de critérios pré-estabelecidos em forma de uma ou mais listas de verificação, que são perguntas sobre operações, manutenção e áreas relacionadas à segurança. As listas de verificação são comumente utilizadas para indicar a conformidade com os procedimentos padrão, onde cada item pode ser fisicamente verificado.
- **Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP):** É um procedimento sistemático para determinar as causas anormais de desvios de processo de comportamento normal e suas consequências negativas (SRINIVASAN &

VENKATASUBRAMANIAN, 1998). De acordo com Rimkevičius *et al.* (2016), a técnica HAZOP visa produzir um conjunto abrangente de falha proveniente de uma oficina de brainstorming, através de reuniões envolvendo as partes interessadas, que permite o desenvolvimento de uma programação de falha e risco para demonstrar que os riscos identificados são controlados, podendo identificar ainda, os possíveis eventos iniciadores, a natureza das consequências de acidentes, os atuais sistemas de segurança, bem como, a exigência de sistemas de segurança adicionais e questões de operacionalidade ou funcionalidade.

- **What-If Analysis:** Semelhante a HAZOP, a análise *What-If* é uma técnica qualitativa utilizando informações para a identificação de riscos, sendo um método de coleta de ideias em que determina o que as coisas podem dar errado e julgar as consequências dessas situações que ocorrem (RENIERS *et al.* 2005).
- **Técnica STEP:** Por último, a técnica da Plotagem do Evento Sequencialmente Cronometrado (STEP) fornece uma reconstrução do processo de dano plotando a sequência de eventos/ações que contribuíram para o acidente. Os analistas constroem uma planilha de passo quais gráficos a evolução dos acontecimentos, ações e intervenções de sistema (no eixo horizontal) realizada pelos agentes (no eixo vertical) (KONTOGIANNIS *et al.* 2000) .

2.1.3 Técnicas Quantitativas

Quanto a técnicas quantitativas, podem ser citadas, entre elas: *The proportional risk-assessment* (PRAT) *technique*, Risco Social, *The Weighted Risk Analysis* (WRA), *Quantitative assessment of domino scenarios* (QADS) e *Predictive, Epistemic Approach* (PEA).

- **Técnica PRAT:** A técnica PRAT usa uma fórmula proporcional para calcular o risco quantificado devido ao perigo. O risco é calculado considerando as potenciais consequências de um acidente, o fator de exposição e o fator de probabilidade. Mais especificamente, um cálculo quantitativo do risco, pode ser dado com a seguinte relação proporcional (MARHAVILAS & KOULOURIOTIS, 2008): $R = P \times S \times F$. O risco é definido por R , P é o fator de probabilidade, S é o fator de gravidade do dano, e F é a frequência (ou a exposição).

- **Quantitative assessment of domino scenarios (QADS):** Efeito dominó assume-se como um acidente em que um evento primário propaga para equipamento próximo, desencadeando um ou mais eventos secundários, resultando em gerais consequências mais graves do que aqueles do evento principal (MARHAVILAS *et al.* 2011). Assim, a avaliação quantitativa dos acidentes dominó requer a identificação, a avaliação da frequência e a avaliação da consequência de todos os cenários dominós, incluindo todas as combinações diferentes de eventos secundárias que podem ser originados por cada evento primário (COZZANI *et al.* 2006).
- **Predictive, Epistemic Approach (PEA):** Este procedimento baseia-se a chamada abordagem preditiva, epistêmica à avaliação de riscos. Ele fornece meios formais para combinar dados e informações subjetivas e permite prever as ações (acidentais) anormais sob a forma de modelos matemáticos, que quantificar epistêmicas (estado-de-conhecimento) incertezas nas características das ações. Os modelos epistêmicos permitem uma estimativa ampla, baseada no conhecimento das probabilidades de danos decorrentes de ações anormais. Estes modelos são considerados para ser o primeiro passo para prevenir perdas (redução) associados a danos decorrentes de ações anormais (MARHAVILAS *et al.* 2011).
- **Weighted Risk Analysis (WRA):** A fim de equilibrar as medidas de segurança com os aspectos, tais como ambiental, qualidade e os aspectos econômicos, é usada uma metodologia de análise de risco ponderado. A análise de risco ponderado é uma ferramenta de comparação de riscos diferentes, tais como investimentos, perdas econômicas e a perda de vidas humanas, em uma dimensão (por exemplo, dinheiro), desde que ambos os investimentos e riscos podem ser expressa unicamente em dinheiro (SUDDLE, 2009).
- **Risco Social:** O risco individual (IR) de acordo com Carneiro *et al.* (2013), pode ser definido como a probabilidade (frequência) de letalidade para uma pessoa sem proteção nas proximidades do local perigoso. Existem várias maneiras de expressar o risco social. Talvez o método mais simples é calcular o número esperado de indivíduos afetados, multiplicando a probabilidade de impacto por pessoa com o número de pessoas que se encontrem na zona de impacto (ERKUT *et al.* 2007).

2.1.4 Técnicas Híbridas

As técnicas híbridas englobam tanto características das técnicas quantitativas quanto aquelas que são consideradas qualitativas. As principais técnicas híbridas serão apresentadas abaixo.

- **Human Error Analysis Techniques (HEAT) ou Human Factor Event Analysis (HFEA):** O objetivo dessas técnicas é a de determinar as razões para a ocorrência de um erro humano, os fatores que influenciam o desempenho humano, e como provavelmente acontecem (MARHAVILAS *et al.* 2011). A próxima etapa da análise do erro segundo Matanovic (2013) é identificar possibilidades de recuperação de erro implícitas dentro da tarefa e para especificar as possíveis estratégias corretivas para eliminar as causas de erros ou para aumentar a sua probabilidade de recuperação antes que ocorram as consequências.
- **Fault-tree analysis e Event Tree Analysis:** De acordo com Andrews (2000), a técnica ETA é comumente usada para identificar as consequências que podem surgir após a ocorrência de um evento potencialmente perigoso. Já a FTA é uma análise dedutiva, que pode ser usada em conjunto com a ETA para identificar as causas das falhas de subsistema ou eventos do ramo. Quantificação da árvore de falha fornece a probabilidade de cada um dos ramos da árvore-evento.
- **Risk-based Maintenance (RBM):** A manutenção baseada no risco fornece uma ferramenta com o objetivo de reduzir a probabilidade de falha do equipamento e suas consequências, além disso, maximiza a confiabilidade do equipamento e consequentemente minimiza o custo da manutenção (KRISHNASAMY *et al.* 2005). A metodologia do RBM é dividida em três módulos principais: (i) a determinação de risco, que consiste na identificação de riscos e avaliação, (ii) a avaliação dos riscos, que consiste de aversão ao risco e análise de aceitação de risco e de risco (iii) o planejamento de manutenção considerando fatores (KHAN & HADDARA, 2003).
- **Matriz de Riscos:** A matriz de riscos é um mapeamento da probabilidade e consequência de risco representados usando cores diferentes: vermelho normalmente indica o nível de risco inaceitável, amarelo ou laranja marca riscos reduzidos e verde geralmente representa riscos aceitáveis (Duan *et al.* 2016). A técnica permite a classificação dos riscos em relação uns aos outros, mas não

fornece nenhuma indicação se o risco calculado é aceitável, tolerável ou inaceitável (WOODRUFF, 2005).

No que se diz respeito a escolha do tipo de método, Aven (2008) lista dois tipos de procedimentos. A escolha do método pode ser feita entre uma abordagem direta ou uma abordagem inversa. Na abordagem direta a análise de risco começa com a identificação dos eventos iniciadores. Depois, as consequências dos vários eventos são analisadas. O objetivo da análise é identificar todos os eventos relevantes e cenários associados. Após a identificação, é realizada uma análise de consequência para cada evento iniciador. O produto final será uma análise de risco que descreve eventos insignificantes e severos, com suas consequências potenciais associados.

Já na abordagem inversa, a análise de risco começa com a identificação dos resultados dos eventos ou situações que são identificadas como importantes na análise, por exemplo, o comprometimento de rotas de fuga, lesões ou perda de vidas. O produto final será uma análise limitada que olha para alguns eventos selecionados capazes de afetar as medidas de desempenho realçadas na análise.

2.2 Apoio à Decisão Multicritério

Decisões fazem parte do nosso cotidiano, sejam elas simples ou complexas, podendo demandar um maior grau de conhecimento ou uma metodologia para apoio a decisão (GOMES *et al.* 2011). Uma condição básica para a existência de um problema de decisão, de acordo com de Almeida (2013), é a existência de pelo menos duas alternativas para que o decisor possa efetuar uma escolha. Segundo Zeleny (2011), frequentemente as opções e alternativas aumentam por parte do decisor, que precisa selecionar, analisar, classificar, ordenar, e assim tomar a decisão em que é preciso considerar múltiplos critérios.

Em problemas de otimização, uma alternativa é escolhida de um conjunto de alternativas, e para cada alternativa há uma função a ser maximizada ou minimizada. Modelos de Decisão Multicritério (MCDA - *Multiple-Criteria Decision Analysis*) lidam com problemas de decisão onde conseguem tratar mais de um objetivo de forma simultânea, conflitantes entre si, muitas vezes com unidades de medidas diferentes (de ALMEIDA *et al.* 2016). O decisor na realidade escolhe que consequência deseja obter, em função disso busca-se então a alternativa que lhe forneça a consequência mais desejável (de ALMEIDA, 2013).

É importante salientar que em um método de apoio a decisão multicritério não há respostas certas devido a sua subjetividade nas informações de entradas. Essa subjetividade é

inerente à escolha dos critérios, a ponderação e avaliação. Portanto, fornece apoio ao processo decisório através de uma recomendação a ser seguida (DEHE; BAMFORD, 2015).

No processo de decisório há várias partes interessadas que estão diretamente associadas à construção de modelos e escolha dos métodos de apoio a decisão (de ALMEIDA, 2013). De acordo com de Almeida (2013), alguns dos atores que participam do processo decisório são:

- Decisor – o decisor estabelece a suas preferências sobre as consequências do problema de decisão. Ele é responsável pela tomada de decisão, bem como responsável pelas consequências de suas escolhas. O decisor pode ser com base em um grupo de decisores ou apenas um decisor.
- Analistas – é responsável por fornecer suporte Metodológico ao processo decisório. Possui entendimento do problema e importante papel na obtenção de informações e na geração de ideias para elencar alternativas.
- Clientes/prepostos – é um intermediário que é designado pelo decisor, pela falta de tempo do mesmo, para acompanhar em seu nome o processo de construção do modelo de decisão junto com o analista.
- Especialistas – é aquele que fornece informações técnicas sobre o problema em análise, por se tratar de um profissional que conhece os mecanismos de comportamento do sistema em estudo, porém, alguém quem te informá-lo sobre o problema porque ele não tem conhecimento sobre ele.
- *Stakeholders* – é aquele que tenta influenciar o decisor de alguma forma, através de algum tipo de previsão, geralmente é afetado pela decisão tomada.

De modo geral, os Métodos de Decisão Multicritérios são divididos em três grandes grupos (MOTA *et al.* 2009; de ALMEIDA, 2013):

Métodos de critério único de síntese: consiste em agregar critérios em uma função única, obtendo uma avaliação global que deve ser otimizada posteriormente; neste grupo, está incluso o *Multi-Attribute Utility Theory* – MAUT ou (Teoria da Utilidade Multiatributo), proposto por (KEENEY & RAIFFA, 1993). O MAUT é uma das teorias mais utilizadas para apoio à decisão em um cenário de incerteza.

Métodos de sobreclassificação ou superação: também chamados de *outranking*, que visam primeiro construir uma relação de sobreclassificação, representando fortemente as preferências estabelecidas pelo tomador de decisão, dada a informação à mão. Neste grupo estão os métodos da família ELECTRE e PROMETHEE.

Métodos interativos: são associados a problemas discretos, ou contínuos, essa classe de métodos inclui Programação Linear Multi-Objetivos (MOLPs).

Os métodos podem ser classificados ainda de acordo com a racionalidade do decisor em matéria de compensação, ou seja, duas racionalidades podem ser consideradas levando a compensatória e não-compensatório. Em métodos compensatórios, um desempenho ruim num critério pode ser compensado por outro de melhor desempenho em outros critérios (de ALMEIDA *et al.* 2016).

Como visto em de Almeida (2013), é considerado um problema de decisão na presença de duas ou mais alternativas para que o decisor possa fazer a escolha. Partindo deste ponto, a avaliação destas alternativas é feita com base nas problemáticas com base em sua classificação, conforme exemplificadas a seguir:

- Problemática de Escolha: $P.\alpha$ – possui como objetivo esclarecer a decisão dentre um subconjunto de ações (melhores ações ou as mais satisfatórias), tendo em vista a escolha final de uma única ação.
- Problemática de Classificação: $P.\beta$ – consiste em classificar cada ação em uma classe ou categoria. As diferentes categorias são definidas a priori, com base em normas aplicadas no conjunto de ações.
- Problemática de Ordenação: $P.\gamma$ – ordena de forma completa ou parcial conforme as preferências do decisor as ações de forma decrescente.
- Problemática de Descrição: $P.\delta$ – esta problemática consiste em descrever um problema de decisão com suas ações e consequências, em linguagem apropriada, portanto, tem como resultado, uma descrição ou processo cognitivo.

Problemática de Portfólio – tem como objetivo escolher do conjunto de alternativas, certo subconjunto que atenda aos objetivos, sob determinadas restrições. Um exemplo é o portfólio de projetos que consiste em escolher um subconjunto que eleve os benefícios obtidos sujeitos a algum orçamento (DE ALMEIDA 2013).

2.2.1 Teoria da Utilidade Multiatributo – MAUT

A Teoria da Utilidade Multiatributo ou *Multi-Attribute Utility Theory* – MAUT, é derivada dos conceitos da Teoria da Utilidade e da Teoria da Decisão (KEENEY& RAIFFA, 1993).

Para Ferreira *et al.* (2009) e de Almeida (2013), a abordagem da teoria da decisão permite tratar as incertezas inerente aos problemas a serem analisados através do conhecimento *a priori* de especialistas, onde a quantificação é realizada através da função

utilidade, que está associada a uma avaliação das consequências em um contexto probabilístico. Além disso, a modelagem probabilística é um complemento para as preferências do decisor. A ideia básica da teoria da utilidade é quantificar os desejos do decisor, relacionando os bens aos valores que representam uma regra de escolha para o tomador de decisão.

O MAUT traz em sua estrutura de preferência a ideia de compensação entre os critérios (*trade-off*) e requer o uso de uma função de síntese que agrega todos os critérios em uma única função (FERREIRA *et al.* 2009).

Segundo de Almeida & Bohoris (1995), essa função expressa as preferências do decisor, onde a elicitación da função de utilidade envolve a compreensão e modelagem da estrutura de preferências do tomador de decisões em relação às consequências, em que as diferenças culturais e políticas variadas da empresa são muito influentes. A função de utilidade é normalmente obtida a partir de um procedimento que envolve as etapas de modelar a função de utilidade multiatributo e condicional para cada atributo, que é uma medida da preferência para cada valor das consequências.

Os procedimentos demonstrados acima para dois atributos podem ser aplicados para um número maior de atributos, como demonstrado pela Figura 2.3. A forma hierárquica pode facilitar este processo de avaliação para um número maior de atributos. Para o caso em questão obtém-se uma função utilidade $u(x)$ em função de $u(y_1)$ e $u(y_2)$. Assim são obtidos por: $u(y_1) = f_1[u(x_1), u(x_2)]$ e $u(y_2) = f_2[u(x_3), u(x_4)]$.

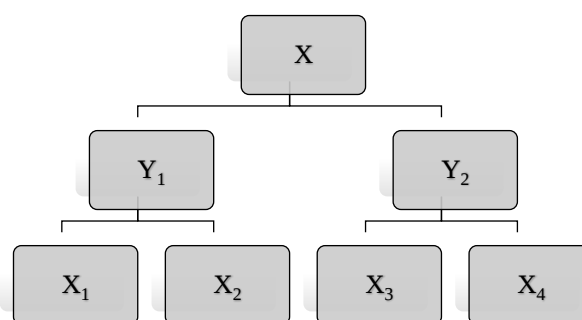


Figura 2.3 - Estrutura Hierárquica para mais de dois atributos

Fonte: Adaptado de Almeida (2013)

O modelo proposto baseia-se no MAUT para mais de dois atributos incorporando a estrutura de preferências do decisor em várias dimensões de risco, de maneira a construir um ranking dos trechos de uma ferrovia em termos de risco.

3 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Neste capítulo, é apresentada a contextualização referente ao gerenciamento de risco em transporte de produtos perigosos através das ferrovias. Posteriormente, as descrições das principais leis, decretos e normas que regulamentam esta atividade, bem como a apresentação de dados de acidentes ferroviários ocorridos no Brasil, suas causas, consequências e os principais produtos envolvidos.

3.1 Breve Histórico das Ferrovias Brasileiras

O transporte ferroviário brasileiro passou por vários períodos ao longo dos dois últimos séculos, em que a primeira composição ferroviária a circular no Brasil, de acordo com a CNT (2015), foi datada no ano de 1854, com o incentivo de investidores privados, o que se mostrou adequado para o escoamento da produção agrícola que ia em direção ao litoral, até que, por dificuldades financeiras, e de modo a reorganizar o setor, foi criada em 1957 foi a Rede Ferroviária Federal Sociedade Anônima – RFFSA, que tinha o propósito de aprimorar a gestão e a manutenção das ferrovias, como também expandir as malhas existentes, e que, com investimentos estatais chegou a controlar 18 ferrovias, com uma extensão total aproximada de 37 mil quilômetros.

Na década de 1980, o transporte ferroviário no país entrou em declínio devido à perda de competitividade em relação aos demais modais, o que motivou o Programa Nacional de Desestatização – PND. Os principais objetivos do Plano Nacional de Desestatização para o setor ferroviário compreendiam a desoneração do Estado, a melhor alocação de recursos, o aumento da eficiência operacional, o desenvolvimento do mercado de transportes e a melhoria da qualidade dos serviços (CNT, 2015).

Com o processo de concessão das ferrovias, iniciado em 1996, o transporte ferroviário ganhou um novo impulso e hoje está em destaque no cenário nacional. Em 16 anos, a produção ferroviária cresceu 117% e duas vezes mais do que o PIB brasileiro. Hoje, ao todo 28.366 km de ferrovias são operados pelas empresas (ANTF, 2013).

3.1.1 Principais Características Técnicas e Econômicas do Modal Ferroviário

Segundo a CNT (2015), o modal ferroviário torna-se competitivo para o transporte de grandes volumes de carga por longas distâncias, tendo como principais atributos a segurança,

baixo custo, significativa redução de emissão de poluentes, confiabilidade e a disponibilidade do serviço prestado.

Para Novaes (2004), por transportarem maior capacidade de carga, é basicamente mais eficiente em termos de consumo de combustível e de outros custos operacionais diretos quando comparados a outros modais. Por outro lado, os custos fixos de uma ferrovia são altos, fatores como a conservação de via permanente, operação dos terminais de carga e descarga e manobra de trens contribuem para os altos custos para os terminais (BALLOU, 2009). Em contrapartida, as características associadas com o transporte rodoviário tais como flexibilidade e acessibilidade, tornam preferível às ferrovias, especialmente quando as transferências não precisam ser movidos em longas distâncias (BAGHERI; VERMA; VERTER, 2014).

Porém, mesmo com grandes vantagens o transporte de cargas, ainda é muito dependente do rodoviário. Segundo relatório realizado pela (CNT, 2015), as rodovias brasileiras têm a maior participação no transporte de cargas no âmbito nacional, cerca de 61% da movimentação é feita através das rodovias, 20% pelas ferrovias, 13,6% via hidrovia, 4,2% pelo sistema dutoviário, e apenas 0,4% da movimentação é feita por aviões. Ojima (2004) afirma que a distribuição do transporte de carga pelos diferentes modais é decorrência da geografia de cada país e também dos incentivos governamentais no setor.

Dados da CNT (2015) mostram ainda que a densidade da malha ferroviária brasileira, por exemplo, é apenas 3,6 km de ferrovias para cada 1.000 km² de área terrestre, sendo inferior quando comparado aos Estados Unidos, Índia e China, que possuem densidade do transporte ferroviário (km de infraestrutura por 1.000 km² de área terrestre) de 32, 23 e 20,5 respectivamente.

Vale ressaltar que os investimentos feitos no setor têm aumentado o volume de produtos sendo movimentados por ferrovias, assim como a produção. De 2006 a 2014, o total de TKU produzidas pelo transporte ferroviário cresceu 28,9%, passando de 238,4 bilhões para 307,3 bilhões. Em relação aos volumes transportados, em toneladas úteis (TU), de 2006 a 2014, houve crescimento de 19,6%. Em 2014, foram transportadas, por ferrovias, 465,2 milhões de toneladas de carga; em 2006, eram 389,1 milhões. No período de 2011 a 2014, as principais mercadorias transportadas nas ferrovias brasileiras foram o minério de ferro, com 76,0% do total de TU transportados, seguido pela soja, com 3,4% e pelo milho, com 2,5%. Açúcar e carvão mineral, por sua vez, representaram 2,3% e 2,1% do total transportado no período, respectivamente.

3.2 Gerenciamento de Risco no Transporte de Produtos Perigosos

O termo “Produto Perigoso” é originário do inglês “*Hazardous Materials*” ou “*Hazmat*” cuja tradução significa “Materiais Perigosos”. A Resolução ANTT nº420/04 define produto perigoso, *toda substância ou artigo encontrado na natureza ou produzido por qualquer processo que, por suas características físico-químicas, represente risco para a saúde das pessoas, para a segurança pública ou para o meio ambiente.*

Devido as características destas substâncias, é importante que haja um gerenciamento de risco eficiente, sobretudo no que diz respeito ao transporte desse tipo de carga, sendo parte da preocupação dos órgãos governamentais e empresas, que em caso de acidentes, pode trazer danos à saúde humana, ao meio ambiente e os demais impactos causados por estes produtos caso haja o lançamento. Isso acontece porque pessoas que vivem ao entorno das ferrovias ficam mais expostas ao risco de acidentes, uma vez que a maior parte da liberação desses produtos ocorrem durante o transporte (CHIOU, 2016). Esses riscos são os principais elementos que separam os problemas de transportes de produtos perigosos de outros tipos de cargas transportadas (ERKUT *et al.* 2007).

O gerenciamento de risco no transporte de produtos perigosos pode ser conseguido com o desenvolvimento de políticas, técnicas e metodologias que englobem o transporte de mercadorias perigosas e assim detectar e corrigir os gargalos existentes. Neste sentido, o crescimento do transporte ferroviário e a preocupação com a movimentação de produtos perigosos, fizeram com que vários estudos de gerenciamento e avaliação de risco surgissem (Assadipour, 2015; Erkut & Ingolfsson, 2005; Verma, 2011; Verma, 2009), como também algumas aplicações (Milazzo *et al.* 2002; Bubbico *et al.* 2006; Cozzani *et al.* 2007; Milazzo *et al.* 2010).

Em um primeiro momento, vários autores demonstraram uma tendência em comparar e avaliar o transporte que oferece o menor risco para a movimentação de produtos perigosos (Purdy, 1993; Andersson, 1994^a; Bubbico *et al.* 2000; Bubbico *et al.* 2004; Bubbico *et al.* 2006; Evans & Addison, 2009). No entanto, não há um consenso entre os autores qual modalidade de transporte, seja ferroviário, marítimo ou rodoviário oferece o menor risco para a população, meio ambiente etc.

Purdy (1993), por exemplo, oferece um tutorial sobre a avaliação de risco de transporte de materiais perigosos, bem como a comparação dos modais ferroviário e rodoviário. Ele considera que os riscos de transporte ferroviário são consideravelmente mais elevados do que os riscos de transporte rodoviário, principalmente porque as ferrovias tendem a passar por

cidades, enquanto o sistema rodoviário há uma tendência em passar ao redor das cidades. Andersson (1994) através do cálculo do custo total de risco determinou dentre os modais ferroviário, rodoviário e marítimo o mais seguro para o transporte de produtos perigosos, revelando que o custo de risco trabalhou em favor da ferrovia, mas não o suficiente para reverter a vantagem de custo do transporte rodoviário.

De forma contrária, Bubbico *et al.* (2000) considera o transporte ferroviário uma modalidade de transporte mais segura em relação ao transporte rodoviário, principalmente devido à sua baixa taxa de acidente, mesmo que, em caso de acidente, a quantidade do vazamento, e, portanto, a zona de impacto, é maior. Da mesma forma, Bagheri *et al.* (2013), concluíram que o risco de transporte de materiais perigosos pode ser reduzido pelo uso de transporte ferroviário para atender a demanda, em relação ao transporte rodoviário.

Mesmo que a taxa de acidentes ferroviários seja menor, nem sempre é possível fazer o transporte por esse tipo de modal. Em alguns casos, as indústrias não têm acesso ao modal ferroviário. Porém, muitos estudos estão centrados na intermodalidade, em que são combinados os mais diversos modais de transportes, aproveitando as vantagens que cada modal possa trazer, seja no modal que oferece o menor risco a população ou meio ambiente ou custo de transporte, como é o caso do transporte ferroviário em relação ao rodoviário, dada a sua baixa taxa de acidentes e sua eficiência energética ou ainda a flexibilidade que o modal rodoviário traz, podendo alcançar locais onde a ferrovia nem sempre consegue. A intermodalidade é constantemente abordada na literatura (Verma & Verter, 2010; Verma & Verter; Zufferey 2012; Reniers & Dullaert, 2013; Macharis & Bontekoning, 2004; Talarico *et al.* 2015).

Macharis & Bontekoning (2004) definem o transporte intermodal como a combinação de pelo menos dois modos de transporte numa cadeia de transporte única, sem uma mudança de recipiente para a mercadoria, com a maior parte da rota percorrida pelo transporte ferroviário, fluvial ou navio de longo curso, e com o mais curto possível inicial e jornadas finais por estrada. Esse tipo de transporte experimentado um crescimento fenomenal ao longo das últimas duas décadas, e continua a ser um dos segmentos de crescimento rápido da indústria de transporte, uma vez que sua atratividade decorre de duas fontes, que segundo Assadipour *et al.* (2015) são: a redução significativa da incerteza, tanto da entrega, quanto do *lead-time* por conta da operação com base em programação de trens intermodais, e uma movimentação global mais eficiente e eficaz em termos de custos, assegurada através da combinação dos melhores atributos dos dois modos.

A fim de reduzir estas incertezas, Bubbico *et al.* (2006) fizeram uso de um estudo de caso para sugerir essa redução significativa do risco pode ser conseguida movendo-se algumas das atividades de transporte rodoviário para o ferroviário e intermodal ferroviário-caminhão. Posteriormente, Talarico *et al.* (2015) apresentaram um modelo de segurança-transporte multimodal para alocar recursos de segurança dentro de uma cadeia de suprimentos químicos que se caracteriza pelo uso de diferentes modos de transporte, cada um com seus próprios recursos de segurança, considerando também, os riscos relacionados aos atos terroristas que poderiam visar sistemas de transporte críticos.

Mesmo que a gestão de risco no transporte de produtos perigosos seja parte da preocupação das indústrias, as mesmas seguem normas estabelecidas por órgãos governamentais, nas quais são de caráter obrigatório. Essas normas estabelecem requisitos mínimos a serem cumpridos, normas essas que serão abordadas na seção posterior.

Além disso, as autoridades internacionais, em diferentes níveis, decidiram abordar o problema através de uma padronização dos procedimentos de análise de risco e avaliação. Dentre as normas internacionais específicas de gestão de risco estão (ISO/IEC 27001, 2013; ISO 28000, 2007; ISO 31000, 2009) (SAPORI *et al.* 2014).

A norma ISO 27001 é o padrão e a referência Internacional para a Gestão da Segurança da Informação. Já a norma ISO 28000 especifica requisitos mínimos para um sistema de gestão de segurança, incluindo aspectos fundamentais que garantem a segurança da cadeia logística. Esses aspectos incluem todas as atividades que são controladas ou influenciadas por organizações que impactam de alguma maneira a segurança na cadeia logística. A norma ISO 31000 pode ser utilizada por qualquer empresa pública ou privada, portanto, não é específica para qualquer indústria ou setor, podendo ser aplicada a qualquer tipo de risco ao longo da vida de uma organização e a uma ampla gama de atividades, incluindo estratégias, decisões, operações, processos, funções, projetos, produtos, serviços e ativos.

3.3 Regulamentação para o Transporte de Produtos Perigosos

3.3.1 Principais Leis e Normas Regulamentadoras Brasileiras

Para falar do transporte ferroviário de produtos perigosos, é necessário antes citar os principais órgãos responsáveis pela fiscalização e controle, bem como a competência de cada um deles. Primeiramente cabe destacar os órgãos responsáveis pela fiscalização e controle, como é o caso do Ministério dos Transportes. De acordo com o Decreto nº 7.717 de 4 de abril

de 2012, o Ministério dos Transportes, órgão da administração pública federal direta, tem como áreas de competência os seguintes assuntos:

I - política nacional de transportes ferroviário, rodoviário e aquaviário;

II - marinha mercante, vias navegáveis e portos fluviais e lacustres, excetuados os outorgados às companhias docas;

III - participação na coordenação dos transportes aeroviários e serviços portuários.

Ao Ministério dos Transportes estão vinculadas as seguintes entidades:

A) Autarquias:

1. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT;

2. Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT;

A Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT é responsável pelas concessões rodoviárias e ferroviárias associados a exploração da sua infraestrutura, bem como a permissão do transporte coletivo regular de passageiros pelos meios rodoviário e ferroviário não associados à exploração da infraestrutura e a autorização para o transporte de passageiros por empresa de turismo e sob regime de fretamento, transporte internacional de cargas, transporte multimodal e terminais (ANTT, 2016). Ao DNIT compete implementar as políticas formuladas pelo Ministério dos Transportes e pelo Conselho Nacional de Integração de Políticas de Transporte - CONIT para a administração, manutenção, melhoramento, expansão e operação da infraestrutura do Sistema Federal de Viação, segundo os princípios e diretrizes fixadas na Lei nº 10.233, de 2001, e no seu Regulamento. Compete também, promover pesquisas e estudos experimentais nas áreas de engenharia rodoviária, ferroviária, aquaviária e portuária, incluindo seu impacto sobre o meio ambiente. Além disso, o DNIT estabelece padrões, normas e especificações técnicas para os programas de segurança operacional, sinalização, manutenção, restauração de vias, terminais e instalações, bem como para a elaboração de projetos e execução de obras viárias.

Como é possível perceber, o governo tem papel fundamental no gerenciamento de risco no transporte ferroviário de produtos perigosos, e uma das formas de gerenciamento se dá através de instrumentos legais, como decretos, resoluções e leis.

Dentre as leis e decretos está o Decreto nº 98.973, de 21 de fevereiro de 1990, que aprova o Regulamento do Transporte Ferroviário de Produtos Perigosos, estabelecendo regras para o transporte. O Decreto Nº 98.973/90 trata das condições do transporte, veículos, equipamentos, formulação e da circulação do trem, assim como o despacho, carregamento e descarregamento, manuseio e armazenamento.

De acordo com o decreto, o trem deverá ter o conjunto de equipamentos necessários para atendimento em caso de acidentes, avarias ou outras emergências, tais como: equipamentos de proteção individual, equipamentos de comunicação e primeiros socorros. Além disso, os vagões e equipamentos que foram utilizados para o transporte de produtos perigosos só poderão ser utilizados para outros fins após a limpeza e descontaminação. Fica proibido o transporte de produtos perigosos em trens de passageiros. É proibido também, transporte de animais, e produtos com risco de contaminação juntamente com alimentos e medicamentos ou objetos para uso humano ou animal. As operações de carregamento e descarregamento de produtos perigosos são de responsabilidade, respectivamente, do expedidor e do destinatário, respeitadas as condições de transporte indicadas pela ferrovia. Outras leis, decretos e resoluções podem ser vistas através do Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Principais decretos e resoluções que regem o transporte ferroviário

Leis, Decretos e Resoluções	Ementa
Decreto nº 2.866/98 ANTT	Aprova o regime de infrações e sanções aplicáveis ao transporte terrestre de produtos perigosos;
Resolução nº 420/04 ANTT	Aprova as Instruções Complementares ao Regulamento do Transporte Terrestre de Produtos Perigosos;
Resolução Nº 1573/06 MT	Institui o Regime de Infrações e Penalidades do Transporte Ferroviário de Produtos Perigosos no âmbito nacional;
Resolução nº 2748/08 ANTT	Dispõe sobre os procedimentos a serem adotados pelas concessionárias de Serviço Público de Transporte Ferroviário de Produtos Perigosos.

Fonte: Portal Produtos Perigosos (2016a)

O Decreto nº 2.866/98 da ANTT acorda de forma parcial a facilitação do transporte de produtos perigosos entre os Governos da Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai em 30 de dezembro de 1994, no que se diz respeito as infrações e penalidades aplicáveis ao expedidor pelo descumprimento do Art 19. do Capítulo V da resolução.

Dentre as infrações estão: Embarcar, no veículo, produtos perigosos incompatíveis entre si; Embarcar produtos perigosos a granel em veículos ou equipamentos ferroviários não adequados ao produto transportado; Expedir produto perigoso com acondicionamento em desacordo; Embarcar produto perigoso em veículo desprovido dos elementos identificadores do carregamento; Embarcar produto perigoso em veículo ou equipamento em evidente mau estado de conservação; Deixar de prestar os necessários esclarecimentos técnicos e o apoio em situações de emergência, quando for solicitado pelas autoridades ou seus agentes.

Quanto as penalidades, o transportador internacional terrestre que haja cometido infração e conforme a gravidade desta, serão aplicadas as multas a seguir: a) multa de US\$500 - por infração leve; b) multa de US\$3.000 - por infração grave; e c) multa de US\$6.000 - por infração muito grave. Já a Resolução N° 1573/06 MT, institui o Regime de Infrações e Penalidades do Transporte Ferroviário de Produtos Perigosos no âmbito nacional.

A regulamentação da Resolução 420 da ANTT, de 12 de fevereiro de 2004 fornece ainda as definições e informações sobre ensaios necessários para classificar o produto nas diversas classes e subclasses conforme observado no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Classificação dos produtos perigosos conforme a Resolução 420 da ANTT

Classes	Tipos
CLASSE 1	Explosivos Subclasse 1.1 Substâncias e artefatos com risco de explosão em massa; Subclasse 1.2 Substâncias e artefatos com risco de projeção; Subclasse 1.3 Substâncias e artefatos com risco predominante de fogo; Subclasse 1.4 Substâncias e artefatos que não representam risco significativo; Subclasse 1.5 Substâncias pouco sensíveis; Subclasse 1.6 Substâncias extremamente insensíveis.
CLASSE 2	Gases Subclasse 2.1 Gases inflamáveis; Subclasse 2.2 Gases comprimidos não tóxicos e não inflamáveis; Subclasse 2.3 Gases tóxicos por inalação.
CLASSE 3	Líquidos Inflamáveis
CLASSE 4	Sólidos Inflamáveis Subclasse 4.1 Sólidos inflamáveis; Subclasse 4.2 Substâncias passíveis de combustão espontânea; Subclasse 4.3 Substâncias que, em contato com a água, emitem gases inflamáveis.
CLASSE 5	Substâncias Oxidantes; Peróxidos Orgânicos Subclasse 5.1 Substâncias Oxidantes; Subclasse 5.2 Peróxidos Orgânicos.
CLASSE 6	Substâncias Tóxicas; Substâncias Infectantes Subclasse 6.1 Substâncias Tóxicas; Subclasse 6.2 Substâncias Infectantes.
CLASSE 7	Substâncias Radioativas
CLASSE 8	Substâncias Corrosivas
CLASSE 9	Substâncias Perigosas Diversas

Fonte:(ANTT, 2004)

A ABNT mantém uma comissão permanente, formada por técnicos dos órgãos, setores e entidades envolvidos com transporte de produtos perigosos. Esta comissão é responsável pelo estudo e elaboração de Normas Técnicas Oficiais, que são editadas e periodicamente

revisadas. O Quadro 3.3 apresenta um resumo do conteúdo das principais normas técnicas relacionadas ao transporte de produtos perigosos.

Quadro 3.3 - Principais normas regulamentadoras

NORMAS	EMENTA
NBR7500	Estabelece a simbologia convencional e o seu dimensionamento para produtos perigosos, a ser aplicada nas unidades de transporte e nas embalagens, a fim de indicar os riscos e os cuidados a serem tomados no transporte terrestre, manuseio, movimentação e armazenamento, de acordo com a carga contida.
NBR7501	Define os termos empregados no transporte terrestre de produtos perigosos NBR7503
NBR7503	Especifica os requisitos e as dimensões para a confecção da ficha de emergência e do envelope para o transporte terrestre de produtos perigosos, bem como as instruções para o preenchimento da ficha e do envelope.
NBR15868	Acidentes ferroviários (Classifica ocorrência ferroviária)
NBR9075	Padroniza ficha técnica ao transporte ferroviário de mercadoria perigosa
NBR9735	Estabelece o conjunto mínimo de equipamentos para emergências no transporte terrestre de produtos perigosos, constituído de equipamento de proteção individual, a ser utilizado pelo motorista e pessoal envolvido (se houver) nas operações de transporte do veículo, equipamentos para sinalização, isolamento da área da ocorrência (avaria, acidente e/ou emergência) e extintor de incêndio portátil.
NBR11659	Padroniza lista de comprovação do carregamento a granel de mercadoria perigosa (MP) em vagão-tanque para transporte ferroviário.
NBR12982	Fixa os requisitos mínimos exigíveis para a desvaporização de tanque para transporte terrestre de produtos perigosos - classe de risco 3 - líquidos inflamáveis.
NBR13221	Especifica os requisitos para o transporte terrestre de resíduos, de modo a evitar danos ao meio ambiente e a proteger a saúde pública.
NBR13745	Padroniza princípios gerais para o preenchimento da ficha de declaração de carga para o transporte ferroviário de mercadoria perigosa.
NBR13900	Padroniza conteúdo programático do treinamento de pessoas envolvidas no transporte de produto perigoso por ferrovia.
NBR14064	Estabelece os requisitos mínimos para orientar as ações básicas a serem adotadas por entidades ou pessoas envolvidas direta ou indiretamente em situações de emergência, no transporte terrestre de produtos perigosos.
NBR14619	Estabelece os critérios de incompatibilidade química a serem considerados no transporte terrestre de produtos perigosos.

Fonte: Portal Produtos Perigosos (2016)

Entre as NBR's, é importante citar a NBR15868 que classifica os acidentes ferroviários e estabelece os requisitos comunicações e relatórios dos acidentes. Os acidentes são classificados quanto a sua natureza, gravidade e a causa. Quanto a natureza estão: descarrilamento, colisão, explosão, incêndio e atropelamento.

Conforme a Resolução nº 1431 de 26/04/2006 / ANTT, considera-se grave aquele acidente que acarrete mortes ou lesões que causem incapacidade temporária ou permanente, interrupções de tráfego e danos ambientais. Quanto à causa, os acidentes são classificados como: operação, via permanente, material rodante, sinalização e atos de vandalismo. Em caso de acidentes, a comunicação deve ser de forma inicial e complementar, informando aos

órgãos competentes, contendo a natureza do acidente, a descrição das causas do acidente, o local, data e hora, assim como o número de morte e se houve a evacuação da população. O relatório deve conter todas estas informações.

Mesmo sendo imprescindível o envolvimento dos órgãos governamentais na prevenção e mitigação dos riscos, ainda não é suficiente para diminuir os efeitos da ocorrência de qualquer tipo de acidente com produtos perigosos nas ferrovias, tornando a empresa proprietária do material transportado e a transportadora as principais responsáveis pelas medidas corretivas e preventivas.

3.3.2 Acidentes Ferroviários com Produtos Perigosos no Brasil

O Brasil ainda não possui uma base sólida de dados detalhados sobre acidentes no transporte de produtos perigosos no âmbito nacional, o que vem a ser um fator limitante para o diagnóstico e o planejamento de ações corretivas e preventivas. No entanto, existem instituições como a Agência Nacional de Transportes – ANTT e a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB/SP que trazem dados relevantes sobre acidentes.

No âmbito nacional, o relatório de acidentes realizado pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (2014) no período de 2006 a 2013, foram relatados 8738 acidentes ferroviários, a principal causa, foi a via permanente, denominação dada para o conjunto de camadas e de elementos que possibilita a passagem do trem. Outras causas podem ser vistas através da Figura 3.1.

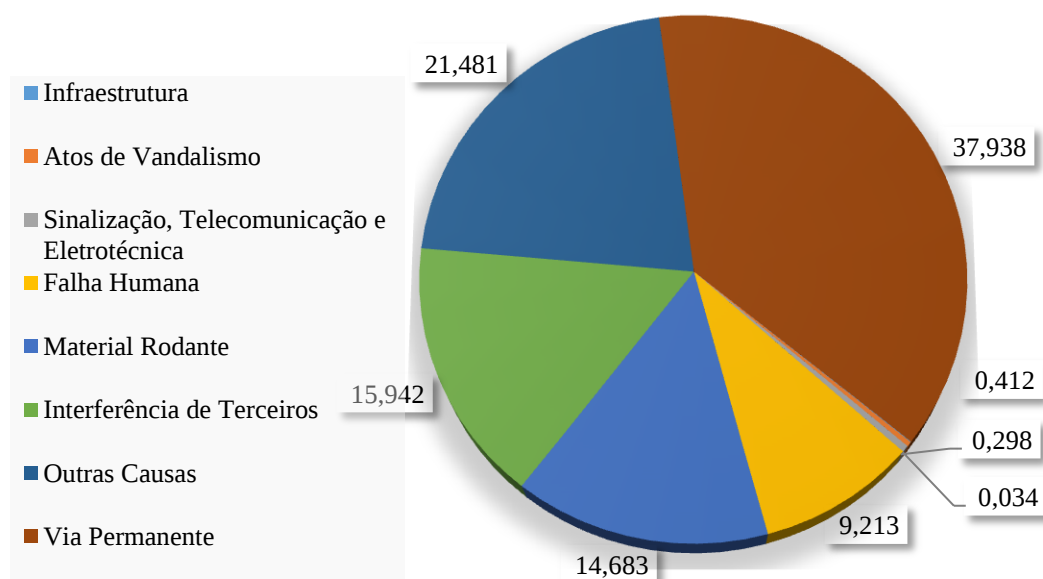


Figura 3.1 - Acidentes ferroviários entre 2006-2013

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Transporte Terrestre – ANTT (2013)

O Quadro 3.4 apresenta alguns exemplos das várias consequências de um acidente ferroviário que ocorreram no Brasil que foram considerados de grandes proporções.

Quadro 3.4 - Descrição dos acidentes ferroviários e suas consequências

Data/Local	Descrição das consequências
1952 - Rio de Janeiro (RJ)	Um trem de passageiros se chocou com um trem cargueiro, em Anchieta, no Rio de Janeiro. A colisão, considerada um dos piores acidentes ferroviários do país, deixou 90 mortos e 200 feridos.
Outubro de 1958 - São Paulo (SP)	Em outubro de 1958, um acidente ocorreu nas proximidades da estação Lapa, na capital paulista, deixando 14 mortos e dezenas de feridos.
Março de 1959 - São Paulo (SP)	Acidente ferroviário deixa mais de 50 mortos e mais de cem feridos na estação Engenheiro Goulart, na Zona Leste de São Paulo.
Março de 1969 - São Paulo (SP)	Dois trens colidiram na região de Perus, na Grande São Paulo, deixando 20 mortos e 200 feridos.
17 de fevereiro de 1987 - São Paulo (SP)	A região de Itaquera, na Zona Leste de São Paulo, foi palco de um acidente ferroviário que deixou 58 mortos e 140 feridos.
28 de julho de 2000 - São Paulo (SP)	Dois trens da CPTM se chocaram na estação de Perus no dia 28 de julho de 2000, na Zona Noroeste de São Paulo, deixando nove mortos.
23 de novembro de 2000 - Barueri (SP)	Uma pessoa morreu e 17 ficaram feridas em uma colisão entre um ônibus e um trem da CPTM, em 23 de novembro de 2000. O acidente aconteceu em Barueri, na Grande São Paulo.
29 de agosto de 2003 - Jundiaí (SP)	Onze vagões de um trem de carga com 35 descarrilaram em Jundiaí, São Paulo. Quatro vagões tombaram, derrubando quatro jovens que estavam "surfando" sobre os vagões. Um deles morreu e outro ficou ferido.
20 de julho de 2004 - Bandeirantes (PR)	Cinco vagões, carregados com álcool e farelo de soja, tombaram entre Bandeirantes e Cornélio Procopio, no Norte do Paraná.
25 de agosto de 2004 - São Paulo (SP)	Um acidente com um trem da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM) deixou cerca de 20 pessoas feridas na estação Brás, em São Paulo. A composição bateu em uma mureta que fica no fim da linha (para-choque).
25 de março de 2006 - Fortaleza (CE)	Um trem e um ônibus escolar se chocaram em Fortaleza (CE), deixando nove mortos e 20 feridos. O ônibus atravessou o trilho no momento em que o trem se aproximava, provocando a colisão.
23 de julho de 2007 - Arapongas (PR)	A colisão de um carro com um trem deixou duas pessoas mortas e duas feridas em Arapongas (PR), em 23 de julho de 2007. O acidente aconteceu no centro da cidade.
25 de agosto de 2007 - Ijuí (RS)	Sete vagões carregados com combustível saíram dos trilhos e tombaram em Ijuí (RS) na manhã de 25 de agosto. De um dos vagões vazaram cerca de 54 mil litros de óleo diesel.
20 de agosto de 2007 - Pelotas (RS)	O carro do deputado federal Cláudio Diaz (PSDB-RS) se chocou contra um trem na madrugada de 20 de agosto de 2007, em Pelotas (RS); O parlamentar passava pelos trilhos no momento em que a locomotiva passava e teve um braço quebrado.
27 de fevereiro de 2008 - Rio de Janeiro (RJ)	Oito pessoas morreram e 101 ficaram feridas. A SUPERVIA foi multada em 0,3% de seu faturamento em 2006.
24 de outubro de 2013 - Rio Preto (SP)	Trem carregado de milho descarrila deixando oito mortos e seis feridos.
27 de janeiro de 2016 - Betim (MG)	O acidente ocorrido em Betim envolveu um comboio com cinco locomotivas e 82 vagões, que transportavam milho do Triângulo Mineiro até Vitória, no Espírito Santo.

Alguns dos acidentes citados merecem atenção devido suas características, como é o caso do acidente ferroviário ocorrido em Ijuí (RS). Após o tombamento de seis vagões da empresa América Latina Logística (ALL), um dos vagões se rompeu ocasionando o vazamento de 60 mil litros de óleo diesel. Barreiras de contenção 50 metros abaixo do óleo foram colocadas, e poços foram perfurados para verificar onde o óleo se encontrava (GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, 2007).

Em outro acidente ocorrido em Betim (MG), envolveu um comboio com cinco locomotivas e 82 vagões que transportavam milho. Segundo a MRS Logística não houve danos a comunidade. Porém, a passagem de nível foi bloqueada devido a carga tombada, sendo liberada para carros e pedestres apenas horas depois do ocorrido. Segundo a reportagem, devido à grande frequência de acidentes ocorridos nesta linha ferroviária, moradores vivem a sensação de insegurança (MANSUR & PARREIRAS, 2016).

No que se diz respeito a base de dados da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB/SP, a mesma possui um trabalho avançado de levantamento e cadastro de dados referentes a acidentes envolvendo produtos perigosos. A CETESB/SP possui um banco de dados desde 1978 que apresentam entre outras informações, a quantidade de acidentes ocorridos neste período e as classes de risco dos produtos perigosos envolvidos nos acidentes. No Cadastro Geral, período de 1978 a 2016, consta o registro de 10.638 acidentes. A Tabela 3.1 demonstra o número de acidentes por tipo de atividade. Dados da CETESB, (2016), relatam que neste período 1,44% dos acidentes envolvendo produtos perigosos foram através de ferrovias, totalizando 153 registros.

Tabela 3.1 - Acidentes por tipo de atividade

Tipo de Atividade	Total de Acidentes	Porcentagem
Armazenamento	281	0,026
Descarte	493	0,046
Indústria	749	0,070
Mancha Órfã	107	0,010
Nada constatado	564	0,053
Não identificada	908	0,085
Outras	1128	0,106
Postos e Sistemas Retalhistas de Combustíveis	771	0,073
Transporte Aquaviário	411	0,039
Transporte Ferroviário	153	0,014
Transporte por Duto	279	0,026
Transporte Rodoviário	4795	0,451
Total Geral	10638	1,000

Fonte:(CETESB, 2016)

De acordo a CETESB/SP, 36% de todos os acidentes registrados no período de 1978 a 2016 ocorreram com produtos de classe 3, identificado como Líquidos Inflamáveis, 19% não puderam ser identificados ou não classificados em 14% das ocorrências. Substâncias Corrosivas e Gases Inflamáveis somam 11% e 6% respectivamente. Dentre as causas que puderam ser identificadas e classificadas, Tombamento foi a maior causa das ocorrências totalizando 20,38%, seguido de Colisão e/ou Choque com 10,84%, descarte 6,72%, incêndio 4,77% e falha mecânica e operacional 4,47% e 4,13% respectivamente. Outras causas ou não identificadas somam 34,41%.

Quanto aos acidentes registrados pela CETESB/SP, 153 acidentes ocorreram com o transporte ferroviário. Produtos como óleo diesel, gasolina, óleo combustível e óleos lubrificantes estavam presentes em 64% dos casos registrados. Os demais produtos transportados pelas ferrovias podem ser visualizados através da Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Principais produtos transportados pelas ferrovias segundo a CETESB/SP

Tipo de Produto	Números de Ocorrências	Tipo de Produto	Números de Ocorrências
Acetileno, Oxigênio Comprimido, Gasolina, Óleo Diesel	1	Minério De Manganês	1
Açúcar	3	Não identificado	3
Álcool Anidro	2	Óleo Combustível	6
Álcool Etílico	5	Óleo Combustível, Gasolina, Óleo Diesel	1
Álcool Hidratado	1	Óleo Combustível, Óleo Diesel	1
Amônia	2	Óleo Combustível, Óleo Diesel, Gasolina	1
Bauxita	2	Óleo Diesel	55
Biodiesel	1	Óleo Diesel	1
Butanóis, Octano	1	Óleo Diesel, Celulose	1
Celulose	1	Óleo Diesel, Milho	1
Cloreto de Potássio	1	Óleo Diesel e Lubrificante, Cimento, Fluido para Freio	1
Combustíveis para Motores	2	Óleo Diesel e Lubrificante, Açúcar, Milho	1
Enxofre	13	Óleo Diesel, Soja	1
Etanol	2	Óleo Lubrificante	3
Farelo de Soja	2	Óleo Lubrificante	1
Gasolina	10	Óleo Lubrificante, Óleo Aromático	1
Gasolina, Adubo Orgânico	1	Óleo Mineral	1
Gasolina, Óleo Diesel	10	Petróleo, Óleo Diesel	1
Gasolina, Cimento	1	Resíduo Oleoso	1
Mercurio	2	Soja	2
Milho	4	Ureia	1
Minério de Ferro	1		

Fonte: Adaptado de CETESB (2016)

Vale lembrar que produtos como açúcar, milho e soja, mesmo que não sejam considerados como produtos perigosos por sua composição físico-químicas, foram

classificados nos seguintes casos uma vez que um produto perigoso é qualquer substância represente risco para a saúde das pessoas, para a segurança pública ou para o meio ambiente. Ou seja, esses produtos em contato com outras substâncias tais como, óleo lubrificante, gasolina, ou ainda despejados em rios e lagos podem trazer danos para o meio ambiente e seres humanos.

Dentre as causas dos acidentes ferroviários com produtos perigosos que puderam ser identificados e classificados, descarrilamento foi a maior causa das ocorrências totalizando 45%, seguido de tombamento com 11% e Colisão e/ou Choque com 7%, incêndio 5 e falha mecânica 2% das ocorrências. Outras causas podem ser vistas através da Figura 3.2.

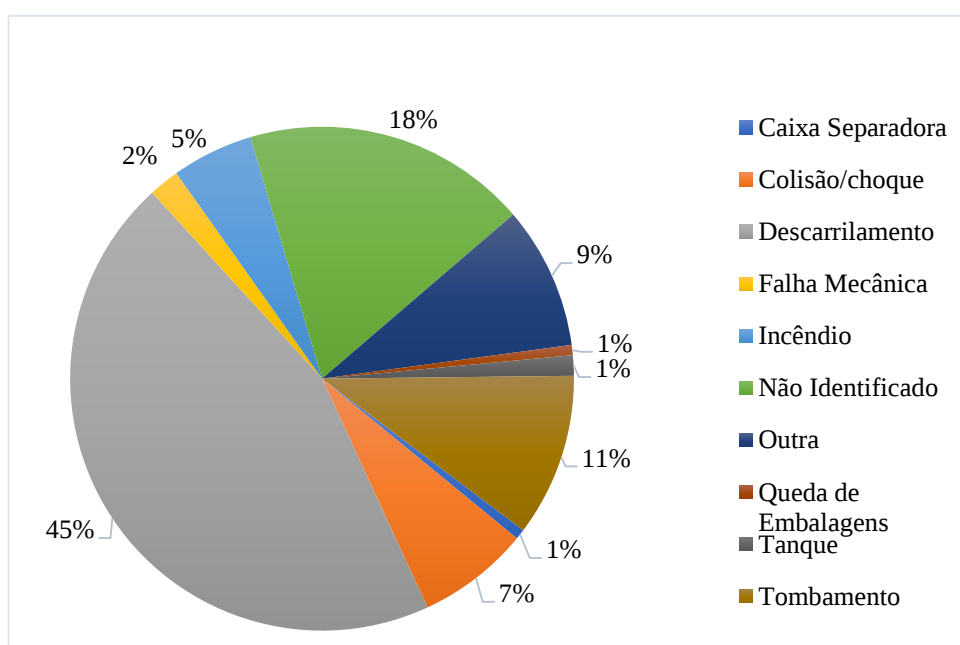


Figura 3.2 - Principais causas dos acidentes ferroviários envolvendo produtos perigosos

Fonte:(CETESB, 2016b)

Em meio as causas dos acidentes ferroviários, é importante detalhar principalmente o descarrilamento, colisão e/ou choque e incêndio devido a sua frequência de ocorrência. Liu, Saat e Barkan (2014) destacam que a maioria dos incidentes com a liberação de materiais perigosos através das ferrovias podem ocorrer como resultado do descarrilamento, e que o número de tanques liberando materiais por descarrilamento são afetados por uma série de fatores, tais como o comprimento do trem, velocidade de com que o trem descarrilou, a sua causa, o ponto de descarrilamento, ou seja, a posição do primeiro vagão descarrilado.

De acordo com a NBR15868, o descarrilamento pode ser provocado também, pelo material rodante, com a fratura no eixo, queda de peças, entre outras causas. O

descarrilamento pode ser provocado pela via permanente, com a fratura e/ou desgaste no trilho, descolamento da via, entre outras, e pode ser resultado de deslocamento da carga, excesso de peso etc.

A NBR15868 lista ainda algumas das possíveis causas para que colisões e/ou choques e incêndio ocorram. Algumas das causas das colisões podem ser avanço de sinal, sinalização incorreta ou com má visibilidade, defeito no sistema de freio, desrespeito ao sinal ou ação de terceiros. Explosão ou incêndios podem ser causados por vazamento de substância inflamáveis, combustão instantânea ou desobediência às normas para o transporte de produtos perigosos.

É importante notar que em um acidente ferroviário, muitos vagões podem ser danificados e o tipo de carga lançada pode ser diferente, uma vez que o trem pode transportar várias cargas ao mesmo tempo, como observado na Tabela 3.2. Essa condição faz com que a quantidade de vagões danificados, o tipo de mercadoria e a quantidade liberada sejam únicos em cada acidente, fazendo com que dificulte a obtenção das probabilidades de ocorrência, como também, a construção de um modelo que retrate a realidade.

Enquanto isso, um acidente ferroviário pode trazer várias consequências negativas para a população, principalmente aquelas que residem próximas as linhas férreas, podendo trazer danos a comunidade local, havendo mortes e ferimentos causados pelos acidentes ou ainda transtornos causados pelos mesmos. Contudo, um acidente ferroviário não se restringe apenas a comunidade, pois ainda pode trazer consequências ambientais, fazendo com que danifique rios, solos, ar e águas subterrâneas. Além disso, ainda é preciso considerar os prejuízos financeiros, tais como a perda de materiais e bens, ou ainda multas impostas por órgãos governamentais decorrentes destes acidentes, como demonstrado na seção 3.3.

Outro fator a ser considerado é a consequência logística que um acidente ferroviário carrega consigo, com a interrupção do transporte dos produtos, como também a imagem da empresa perante a população, uma vez que há a sensação de insegurança.

Como é possível perceber, as consequências não se restringem apenas a vida humana, através de mortes, lesões e danos a comunidade, mas também, as consequências ambientais, as consequências financeiras, ou ainda consequências para a cadeia logística. Portanto, em uma avaliação de risco é importante a consideração dessas consequências em um contexto mais amplo, sendo feita de forma conjunta, em uma avaliação multidimensional das consequências.

4 AVALIAÇÃO DE RISCO MULTIDIMENSIONAL

O presente capítulo traz uma breve introdução à multidimensionalidade do risco e caracteriza as principais dimensões de consequências encontradas na literatura, tais como a dimensão de consequência ambiental, financeira, humana, além da inclusão da caracterização da dimensão de consequência logística, e que servirá de base para a construção do modelo sob visão multidimensional. Cada uma das dimensões descritas sofre várias consequências, não se restringindo apenas a unidade monetária, o que é preciso uma nova forma de avaliação do risco. O capítulo trata destas particularidades e apresenta uma proposta de modelo multidimensional para a avaliação de risco no contexto ferroviário de produtos perigosos.

4.1 Introdução ao Risco Multidimensional

Para Aven (2008), a gestão de risco envolve muitas vezes tomada de decisões em situações que são caracterizadas por um elevado risco e incertezas, representando um desafio na medida em que é difícil prever as consequências (resultados) das decisões. Neste processo decisório, é preciso ainda a consideração de vários aspectos que estão intrínsecos a gestão de risco, tais como aspectos técnicos, econômicos, ambientais, políticos, e questões sociais (BRITO *et al.* 2010).

Porém, como mencionado por Garcez & de Almeida (2014), as metodologias tradicionais de análise de risco não consideram todos estes aspectos de maneira conjunta, ou seja, consideram apenas aspectos econômicos, ambientais, ou humanos separadamente na análise de risco, podendo assim não ser a melhor maneira a ser abordada, uma vez que várias dimensões de risco possam ser afetadas. Deste modo, a consideração de várias dimensões tem demonstrado ser um meio eficiente de avaliar os riscos, uma vez que no mundo real, diferentes pontos de vista podem influenciar o processo decisório, como demonstrado por diversos autores (Brito & de Almeida, 2009; Alencar & de Almeida, 2010; Lins & de Almeida, 2012; Garcez & de Almeida, 2014).

Logo, há uma necessidade de metodologias que permitem uma avaliação de risco que englobe esta visão multidimensional, assim como a inclusão das preferências do decisor neste processo, tendo em mente que as organizações estão cada vez mais interessadas em considerar as opiniões e preferências dos gestores em seu processo decisório, além de permitir a inserção do contexto de incerteza que muitos problemas de decisão estão inseridos, sobretudo as incertezas, que segundo Catrinu & Nordgård (2011), ocorre devido as variações naturais,

imprevisíveis, associadas com o sistema ou o ambiente, ou seja, está fora do controle do decisor, sobretudo no contexto de transporte de produtos perigosos.

Partindo do pressuposto de que as preferências do decisor devem estar inseridas na avaliação de risco, e que o mesmo tem um conjunto de valores e múltiplos objetivos que pretendem alcançar, modelos MCDM permitem que estes valores e múltiplos objetivos possam ser modelados, além da consideração do contexto probabilístico (BRITO & de ALMEIDA, 2009). Como já discutido na seção 2.2 e 2.2.1, a Teoria da Utilidade Multiatributo ou *Multi-Attribute Utility Theory* – MAUT, se mostra adequado para o problema de decisão em questão.

Desta forma, verifica-se a importância deste trabalho na proposição de um modelo de decisão multicritério baseado na teoria da utilidade multiatributo para a análise de riscos em transporte ferroviário de produtos perigosos. Sendo assim, é necessário então a descrição das dimensões e as várias formas em que são tratadas na literatura, para que posteriormente venham a ser consideradas no modelo de decisão. Estas descrições serão feitas nas próximas seções.

4.2 Caracterização do Risco Multidimensional

Com a caracterização das dimensões de consequências foi possível o maior entendimento de como cada uma das dimensões podem ser tratadas no contexto de avaliação de risco, em um olhar unidimensional, para que então estas características fossem inseridas em uma avaliação de risco mais ampla.

De acordo com a literatura analisada, foi possível relacionar onze dimensões de risco, sendo duas referentes a danos à segurança humana, duas dirigidas para danos ao ambiente, quatro relacionados a danos financeiros e outras duas dimensões diz respeito a cadeia logística. Esta última é uma das contribuições deste trabalho, uma vez que a análise das consequências de incidentes dentro de uma cadeia logística pode trazer um maior entendimento dos riscos no contexto de transporte ferroviário de produtos perigosos.

Para uma melhor organização, as dimensões foram relacionadas em forma de uma hierarquia, conforme a Figura 4.1. As descrições de cada uma das dimensões são apresentadas nas seções posteriores.

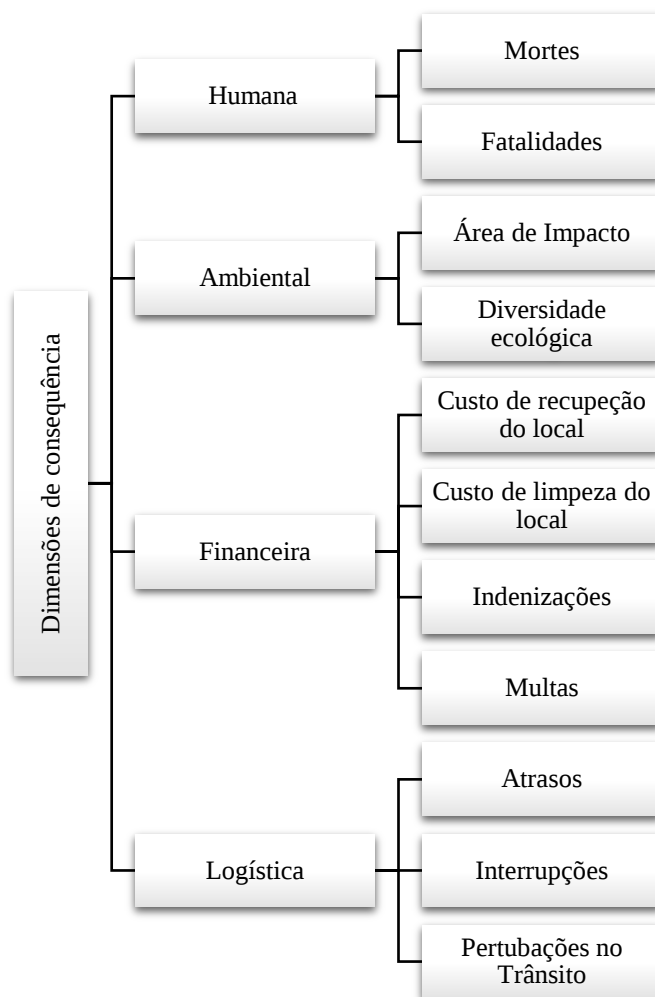


Figura 4.1- Estrutura hierárquica das dimensões de consequências

Cada uma das dimensões acima pode gerar níveis de impactos diferentes para cada trecho da ferrovia, ou seja, ela pode ser impactada de maneiras diferentes, direta ou indiretamente, como por exemplo, o tipo, quantidade e combinações de produtos perigosos a serem transportados, o tipo de vizinhança presente, o número de pessoas que residem próximas as linhas férreas, assim como o nível social podem impactar no número de fatalidades e lesões aos seres humanos em caso de acidentes, uma vez que pessoas com um nível social mais baixo tendem a morar em zonas indústrias ou próximas as linhas férreas.

Outros fatores que podem impactar o número de fatalidades e lesões, como já descritos anteriormente, estão os túneis e passagens de nível, pois em caso de acidentes, as pessoas presentes no local podem enfrentar dificuldades para que sejam evacuadas, ou ainda, dependendo do tipo de produto perigoso lançado no ar, podem enfrentar dificuldades ao respirar, elevando assim o número de vítimas.

Outras dimensões como a ambiental e financeira, sofrem impacto de maneiras diferentes, pois dependem do local do acidente (próximas a rios, lagos, locais montanhosos etc.) ou ainda a fauna e flora presente no local, pois estes impactos ambientais podem ser reversíveis, mitigáveis ou não. Dependendo do tipo de impacto ambiental, as transportadoras responsáveis podem sofrer sanções financeiras por parte de órgãos governamentais, através de multas e indenizações, custos para recuperar o local do acidente, prestação de serviço ou ainda serem impedidas de continuar com tais atividades. O impacto financeiro pode ser através da perda do material lançado, ou o material rodante, e custos com manutenção da linha férrea. Já a dimensão logística, pode ser impactada em decorrência de atrasos, interrupções, impactos ao trânsito, como também impactar na produção.

A depender do decisor novas dimensões de consequências podem ser requisitadas pelo decisor. Mais detalhes são descritos na seção 4.3.

4.2.1 Dimensão de Consequências Humanas

Em se tratando de seres humanos, para uma dimensão das consequências, não é satisfatório utilizar estimativas monetárias para avaliar ou representar danos físicos e fatalidades (BRITO & DE ALMEIDA, 2009). De acordo com Saccomanno & Shortreed (1993), os riscos associados ao transporte de produtos perigosos podem ser visto a partir de duas perspectivas: a sociedade em geral e a individual que reside próximo as rotas. O risco individual pode ser definido como a probabilidade (frequência) de letalidade para uma pessoa sem proteção nas proximidades do local perigoso. Porém, um único acidente poderia resultar numa fatalidade (ou ferir) para um grande número de pessoas. Estas situações podem ser tratadas através da estimativa do risco social (CARNEIRO *et al.* 2013). Saccomanno & Shortreed (1993) propõem uma maneira de representar o risco social através da curva F-N, onde é possível plotar em um gráfico a frequência de ocorrência de um cenário dada a sua probabilidade.

Geralmente a dimensão humana é trabalhada na literatura em número de fatalidades (mortes) ou feridos (Saccomanno & Shortreed, 1993; Viichez *et al.* 1995; Carter & Hirst, 2000; Bubbico *et al.* 2009; Brito & De Almeida, 2009; Alencar & De Almeida, 2010; Liu, Saat e Barkan, 2013; Carneiro *et al.* 2013; Garcez & De Almeida, 2014). Diferentemente dos demais autores citados, Lins & De Almeida (2012) e Garcez & De Almeida (2014) propõem uma desagregação da dimensão humana em dois sub-níveis: fatalidades humanas e danos humanos não letais, utilizando para o cálculo das probabilidades de lesões e mortes modelo

PROBIT. De acordo com Lachance *et al.* (2011), PROBIT são funções úteis em análise de risco quantitativa desde que possam fornecer as probabilidades de danos para a gama de acidentes incluído nas avaliações de risco. Essa probabilidade é dada pela Equação (4.1), podendo também ser aplicada no contexto de transportes ferroviários:

$$P(\text{fatalidades}) = 50 \left[\frac{1 + (y - 5)}{|y - 5|} \right] + \ln \left[\frac{(|y - 5|)}{\sqrt{2}} \right] \quad (4.1)$$

onde Y é a função PROBIT. Através de uma tabela com valores pré-definidos é possível obter o valor de Y, porém, deve se selecionar a função de PROBIT mais apropriada para o contexto que se pretende trabalhar (LACHANCE *et al.* 2011).

O risco à população pode ser estendida, segundo Caramia & Dell’Olmo (2008), em risco coletivamente percebido, que mede a aversão ao risco do público e das autoridades.

Além disso, existem cenários que podem potencializar a exposição social e individual. Segundo Landucci *et al.* (2016), estudos estão focados na análise de consequências dos cenários acidentais que possam afetar a população no seu entorno durante o transporte de materiais perigosos, uma vez que vários fatores têm influência na exposição da população, por exemplo, o tipo de vizinhança, proximidade de locais urbanos, áreas industriais, área de preservação ambiental, local montanhoso, local de difícil acesso, áreas mais suscetíveis a sabotagem e vandalismo, etc.

Várias pesquisas tem como foco outros locais de potenciais perigos a população, dentre eles estão os túneis (Diamantidis *et al.* 2000; Bubbico *et al.* 2009; Guarascio *et al.* 2009; Qixun *et al.* 2010; Vanorio & Mera, 2012; Sala *et al.* 2014; Li, 2014). Para Bubbico *et al.* (2009), túneis podem gerar um perigoso cenário acidental, onde a concentração de gases tóxicos e de sobrepressão é maior em relação ao ar livre. Além disso, pessoas dentro de um túnel podem experimentar dificuldades ao tentar escapar devido à baixa visibilidade.

Bubbico *et al.* (2009) utilizou uma abordagem de Análise de Risco de Transporte (TRA) com base no Sistema de Informação Geográfico (GIS) para avaliar o risco associado ao transporte de alguns tipos de materiais perigosos ao longo de rotas rodoviárias e ferroviárias, que incluía a passagem por túneis. Vanorio & Mera (2012) apresentam uma metodologia de Análise de Risco Quantitativa (QRA) aplicada a tuneis ferroviários, fundamentada na análise e combinação de cenários utilizando técnicas como a Simulação de Monte Carlo que permitiu considerar os fatores de incerteza associados com os riscos. Van Weyenberge *et al.* (2015) apresentam uma abordagem de avaliação integrada de risco

quantitativa as pessoas presentes no túnel no contexto de um risco de incêndio em um túnel ferroviário.

Acidentes em passagens de nível são constantemente investigados devido à grande quantidade de acidentes nesse tipo de local (Hu & Wu, 2008; Zheng *et al.* 2009; Liu & Ghazel, 2015). Em toda a Austrália, por exemplo, ao longo dos dez anos entre junho de 2002 e julho de 2012, 92 colisões entre trens e pedestres em passagens de nível ferroviárias tinham acontecido (READ *et al.* 2015).

A fim de reduzir a taxa de acidente, Hu & Wu, (2008) construíram dois modelos de acidente e identificação dos fatores de risco que podem afetar os índices de severidade e frequência do acidente, tais como o tráfego diário, a largura da travessia e a velocidade do trem. Liu & Ghazel, (2015) discutiram a capacidade de diagnosticar falhas envolvendo fatores humanos e técnicos que podem afetar os acidentes ocorridos em passagens de nível utilizando-se de uma Análise Preliminar do Risco (PRA).

Outro fator de influência é o socioeconômico. Schweitzer (2006) explora se o risco de uma liberação tóxica durante o transporte é maior em bairros pobres e das minorias usando uma combinação de mapeamento e métodos estatísticos. Para o autor, classes menos favorecidas tem uma tendência maior em morar próximas as instalações industriais, ficando assim mais vulneráveis a derramamentos em seu entorno.

4.2.2 Dimensão de Consequências Ambientais

A dimensão ambiental tem recebido atenção nos últimos anos diante das preocupações com o meio ambiente e sua qualidade. No contexto de transportes de produtos perigosos, de acordo com Torretta *et al.* (2017), os riscos desta atividade estão diretamente associados com os impactos sobre o meio ambiente, em particular sobre a qualidade do meio ambiente e na saúde e segurança das pessoas. Para He, Mol, Zhang, & Lu (2015) os riscos ambientais podem estar relacionados também com construção e layout (geográfica) como também, mudança significativa do uso do solo e as consequências para a paisagem e a biodiversidade.

Muitos estudos medem a dimensão de consequência ambiental em termos de custo, como, por exemplo, Saat *et al.* (2014), que utilizou o Modelo de Consequência Ambiental de Transporte de Materiais Perigosos (HMTECM) para estimar os custos de limpezas em solos subterrâneos. Porém, Brito & de Almeida (2009) afirmam que os efeitos causados na vegetação e integridade das espécies animais e o desequilíbrio da biodiversidade numa determinada área nem sempre pode ser expresso em índices monetários.

Autores como Brito & de Almeida (2009); Yoon *et al.* 2009; Alencar & De Almeida, 2010; Cheng & Wen, 2011 Gandini *et al.* 2015; Ardjmand *et al.* 2016 consideram a área de impacto dado um acidente, seja no contexto de transporte de gás via dutos ou ainda outros produtos perigosos através de ferrovias ou caminhões. Lins & De Almeida (2012) expande a dimensão ambiental em dois sub-níveis: área de impacto ambiental e impacto ambiental relacionado a diversidade do meio-ambiente.

De acordo com Lins & de Almeida (2012), ao examinar a diversidade ecológica, é possível incluir aspectos não apenas relacionados a flora do entorno do local de acidentes, mas também a fauna. Segundo Pianka (2011), o conceito de diversidade envolve dois tipos de parâmetros: riqueza e abundância relativa. O primeiro parâmetro é a quantidade de espécies presentes no local de estudo. Já a abundância relativa é a quantidade de indivíduos de determinada espécie que ocorre em um local ou dentro de uma amostra. O cálculo desses parâmetros pode ser conseguido através de vários índices, os mais usados como medidas de riqueza de espécies são os índices de Margalef (D_{mg}) e o de Menhinick (D_{mn}). Estes índices combinam o número de espécies registrado (S) com o número total de indivíduos (N) e são calculados pelas Equações (4.2) e (4.3) (DIAS, 2004):

$$D_{mg} = \frac{(S-1)}{\ln n} \quad (4.2)$$

$$D_{mg} = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (4.3)$$

Ainda de acordo com Dias (2004), modelos que são baseados nas abundâncias proporcionais das espécies são as medidas de diversidade ecológica mais utilizadas. O índice de *Shannon-Wiener* (H') é o mais utilizado para esse tipo de caso, na qual dá maior peso para as espécies raras, obtido pela Equação (4.4):

$$H' = \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \quad (4.4)$$

onde S é o número de espécies, p_i é a proporção da espécie i , estimada como $\frac{n_i}{N}$, n_i é a medida de importância da espécie i , e N é o número total de indivíduos.

4.2.3 Dimensão de Consequências Financeiras

A dimensão financeira corresponde a qualquer tipo de compensação monetária. Porém, de acordo com Vélchez *et al.* (1995), as perdas econômicas provenientes dos acidentes são conhecidas apenas num número muito limitado de casos (18%). Isto dá uma indicação da dificuldade de avaliar estas perdas, e a baixa tendência da indústria para publicar esta

informação. Outro aspecto que também deve ser levado em conta é a dificuldade inerente à comparação dos dados econômicos correspondentes a diferentes períodos. De acordo com Lins & De Almeida (2012), a dimensão de consequência financeira reúne gastos proveniente dos acidentes, compensação financeira ou manutenção. Em estudos anteriores, Brito & De Almeida, 2009; Alencar & De Almeida, 2010 trataram a dimensão financeira como: perdas na receita como resultado das interrupções do fornecimento, interrupção da produção, gastos com mão de obra, multas, indenizações, entre outros.

No contexto de transporte de produtos perigosos, existem ainda outros custos que podem ser agregados, por exemplo, o custo de selecionar a rota que trará o menor risco à população, como também ao meio ambiente. Esta estratégia de reencaminhamento é amplamente utilizada na literatura (Glickman, 1983; Leonelli *et al.* 2000; Glickman *et al.* 2007; Jiang *et al.* 2014). Para Glickman (1983), a exposição pode ser reduzida de 25 a 50% pelo reencaminhamento à custa de um aumento de 15 a 30% de transporte. Reduzindo a exposição desta forma, a ferrovia poderia diminuir a probabilidade de que pessoas que vivem e trabalham nas proximidades da ferrovia sejam mortas, feridas ou incomodadas pelos acidentes em que materiais perigosos são liberados. Porém, Glickman (1983) em seu estudo apenas relata hipoteticamente os efeitos de se fazer o roteamento, mas não desenvolve uma modelagem matemática demonstrando estes efeitos nos custos. Posteriormente, Glickman *et al.* (2007) consideraram uma estratégia de roteamento que assumem os riscos e os custos adicionais para gerar a rota alternativa. De acordo com esses autores as rotas alternativas podem atingir valores de risco significativamente menores do que as rotas originais com um pequeno custo incremental. Como um substituto para o custo do transporte, Glickman *et al.* (2007) utilizaram o comprimento da rota, e mediram o risco estimando a população que reside entorno do local do acidente ferroviário em que envolva a libertação de materiais perigosos.

O custo de derramamento através de transportes de produtos perigosos também é tratado na literatura. Em suas pesquisas, Barkan *et al.* (1991), Schaeffer *et al.* (1995) e Saat *et al.* (2014) consideraram os custos de limpeza em solos e águas subterrâneas em caso de derramamento acidental. Saat *et al.* (2014), por exemplo, utilizaram o Modelo de Consequência Ambiental de Transporte de Materiais Perigosos (HMTECM) para estimar os custos de limpezas em solos e águas subterrâneas.

Além disso, é preciso levar em consideração o *trade-off* entre risco e custo, uma vez que diminuir os riscos podem elevar os custos operacionais, como também, as diminuições de custos podem elevar os riscos. Preocupados com essas questões, pesquisas surgiram neste

sentido na literatura (Verma, 2009b; Verma *et al.* 2012; Fan *et al.* 2015; Assadipour *et al.* 2015; Chiou, 2016; Ardjmand *et al.*, 2016). Fan *et al.* (2015) desenvolveram um modelo que minimiza o risco do transporte de produtos perigosos e custos sujeitos a restrições de fechamento da estrada. Já Verma (2009), Verma *et al.* (2012), Assadipour *et al.* (2015) e Ardjmand *et al.* (2016) fazem o *trade-off* entre o risco no transporte de produtos perigosos e o custo de se transportar a mercadoria através do roteamento, em que assumem vários tipos de custos em seus modelos, tais como o custo de se transportar um produto perigoso dada um tipo de itinerário, o custo de transportar uma carga regular, o custo de transporte utilizando-se de serviços intermodais e os custos fixos de operação da ferrovia.

O custo de substituir o vagão-tanque por outros que possuem materiais mais resistentes, bem como os custos de limpeza dos solos e águas subterrâneas após o derramamento através de transportes de produtos perigosos também é tratado na literatura. Em suas pesquisas, Barkan *et al.* (1991); Schaeffer *et al.* (1995) e Saat *et al.* (2014) consideraram os custos de limpeza em solos e águas subterrâneas em caso de derramamento. De acordo com Schaeffer *et al.* (1995), a consequência do lançamento de produtos perigosos pode ser medida de várias maneiras, porém em sua pesquisa trataram as consequências como custo para limpar o produto derramado, de acordo a Equação (4.5):

$$R_c = FP_c C_c \quad (4.5)$$

onde, R_c é risco de um lançamento *trem por milha em \$*, para uma mercadoria c , F é a taxa de descarrilamento em *trem por milha*, P_c é a Probabilidade de lançamento do grupo de vagões-tanque utilizado para o transporte de mercadorias c e C_c é o Custo esperado para commodities c em \$.

Saat *et al.* (2014), diferentemente de Schaeffer *et al.* (1995), utilizaram o Modelo de Consequência Ambiental de Transporte de Materiais Perigosos (HMTECM) para estimar os custos de limpezas em solos e águas subterrâneas. De acordo com a Equação (4.6), são considerados o custo de limpeza, dado o volume derramado para cada tipo de solo e profundidade.

$$C_{ave} = \sum_{j,k,l} P_j P_k P_l C_{j,k}(Q_1) \quad (4.6)$$

onde C_{ave} é o custo esperado da limpeza, P_j é a probabilidade de um derramamento ocorrido em um tipo de solo; P_k é a probabilidade de um derramamento com profundidade k para as águas subterrâneas; P_l é a probabilidade de um lançamento dado o tamanho do vagão-tanque e o tipo de produto perigoso; $C_{j,k}(Q_1)$ é o custo total da limpeza com volume de derramamento de Q_1 para profundidade j e tipo de solo k para as águas subterrâneas.

Para o custo de substituição dos vagões tanque requer uma abordagem do Valor Presente Líquido (VPL), pois o fluxo do benefício se estende para o futuro, fornecendo uma melhor base para tomada de decisão do que um período de retorno simples (SCHAEFFER; WERTH; MINSKER, 1995). O VPL é calculado com base na Equação (4.7):

$$VPL = \sum_{i=1}^Y \frac{B_i - C_i}{(1+d)^i} \quad (4.7)$$

onde Y é o intervalo de tempo durante o qual o VPL é calculado, supondo que o vagão-tanque tem vida útil igual a 30 anos, B_i é o benefício de reforçar o vagão-tanque reforçada no ano i , C_i é o custo extra de vagão-tanque reforçada no ano i e d é a taxa de desconto, uma vez que custos e benefícios futuros devem ser descontados para que eles sejam constantemente avaliados durante a análise.

4.2.4 Dimensão de Consequências Logísticas

A cadeia de suprimentos e o ambiente corporativo parece cada vez mais vulneráveis as ações do homem e desastres naturais. Esta vulnerabilidade faz com que as empresas e pesquisadores se preocupam em diminuir as perturbações que a cadeia de suprimentos possa vir a sofrer.

Na verdade, tem se observado que gestores tem pouca compreensão do significado de risco e vulnerabilidade no contexto da gestão da cadeia de suprimentos (Shapira, 1995; Zsidisin, G., 2003; Zsidisin, G. a, 2003). Em um estudo inicial que envolveu a participação de diversos gestores quanto a percepção que os mesmos tinham sobre o risco na cadeia de suprimentos, Zsidisin (2003) definiu o risco de abastecimento como a probabilidade de um incidente relacionado com falhas de fornecimento interno de fornecedores individuais ou no mercado de fornecimento, resultando na incapacidade da empresa atender a demanda do cliente ou provocar ameaças à vida do cliente e segurança.

Este é um ponto de partida de vários pesquisadores da área de gerenciamento da cadeia de suprimentos, uma vez que trabalhos têm seguido a tendência de identificação e classificação dos riscos, assim como as definições dos conceitos iniciais (Svensson, 2000; Chopra & Sodhi, 2004; Cavinato, 2004; Sheffi, 2005; Tang & Tomlin, 2008; Tang; 2011; Sodhi, 2012).

Chopra & Sodhi (2004) e Tang & Tomlin (2008) classificam as perturbações na cadeia de suprimentos em pelo menos onze riscos diferentes: riscos de oferta, riscos de processo, riscos de demanda, risco de propriedade intelectual, riscos comportamentais, risco políticos e sociais, desastres naturais e provocados pelo homem, previsão, inventário e capacidade.

Quanto a classificação dos riscos que envolvem a cadeia de suprimentos, Vilko & Hallikas (2012) afirmam que podem ser baseados em tempo e em qualidade. Efeitos baseados em tempo, adiam ou interrompem o fluxo de materiais da cadeia de abastecimento, desta forma, a mercadoria não chega ao seu destino como esperado pelo cliente, sendo assim, identificado como um colapso. Efeitos baseados em qualidade resultam de danos para as mercadorias transportadas ou o equipamento de transporte.

Porém, nem todas as perturbações citadas interferem diretamente na cadeia logística no transporte ferroviário de produtos perigosos em caso de acidentes, tais como o risco de propriedade intelectual, comportamentais, oferta e demanda.

No contexto de transportes, a gestão de riscos nos sistemas de logísticos incluem principalmente o gerenciamento de risco de interrupção (TANG, 2006). Estas interrupções são muitas vezes imprevisíveis e raras, porém geram uma alta consequência. Como exemplo, estão os desastres naturais, greves de trabalho, incêndios e terrorismo, propiciando a interrupção do fluxo de materiais.

As interrupções podem fazer com que os clientes deixem de utilizar o transporte ferroviário como alternativa para a movimentação de seus produtos, afetando assim a imagem e a reputação da empresa quanto a confiabilidade dos serviços prestados, bem como, afetar negativamente a capacidade de satisfazer seus clientes. Uma vez que ocorre um incidente, alguns clientes, em vez de esperar mais tempo para a entrega de seus produtos podem desistir de utilizar o transporte ferroviário. Segundo Sun *et al.* (2016), o número de clientes que utilizam o transporte ferroviário é dado pela Equação (4.8):

$$Q_{Miss} = \sum_{S \in S_d} \sum_{t \in [t_s, t_e]} \ln_t^{sn} - \sum_{S \in S_d} \sum_{t \in [t_s, t_e]} \ln_t^{se} \quad (4.8)$$

onde $\ln_t^{sn}$ e $\ln_t^{se}$ representam os clientes no tempo t em determinada estação s respectivamente, em condições normais e anormais. A variável sd é o conjunto de estações afetadas. Logo, a proporção de clientes perdidos é definida por:

$$\alpha = \frac{Q_{Miss}}{\sum_{S \in S_d} \sum_{t \in [t_s, t_e]} \ln_t^{sn}} \quad (4.9)$$

Quanto aos efeitos baseados no tempo, os atrasos e a variabilidade do tempo de transporte é outra perturbação decorrente de vários fatores, tais como acidentes, condições da via, fenômenos meteorológicos no caso de transporte ou falta de energia elétrica, acidentes com as instalações fixas, acidentes de trabalho e outros nas atividades de movimentação e armazenagem. Senna (1994) trata desta problemática no contexto de risco considerando as

preferências dos decisões e percepções quanto ao risco. A Equação (4.10) é escrita em termos de utilidade esperada, como demonstrada abaixo:

$$E(U) = \gamma_1 \left\{ \left[E \left(t^{\frac{\beta}{t^2}} \right) \right]^2 + Var \left(t^{\frac{\beta}{t^2}} \right) \right\} \quad (4.10)$$

O parâmetro β mede a propensão ou aversão ao risco do decisor, γ_1 é o parâmetro genérico para o tempo de viagem esperado ou médio $E \left(t^{\frac{\beta}{t^2}} \right)$ e o desvio padrão de tempo $Var \left(t^{\frac{\beta}{t^2}} \right)$. De acordo com Senna (1994), o valor do tempo e da variabilidade dependem diretamente da distribuição dos tempos de viagem.

Todas essas características abordadas fazem da cadeia logística mais vulneráveis as perturbações, desta forma o gerenciamento dos riscos se tornam mais complexos dada a rápida expansão do mundo globalizado e integrado, onde uma perturbação pode gerar várias consequências negativas para a toda cadeia logística da empresa como apresentado durante o tópico.

As metodologias citadas podem servir de base para que a empresa crie meios de mitigar ou prevenir o risco de interrupção, uma vez que é o principal risco enfrentado pelas organizações que tentam cumprir com seus compromissos e fazer de seus serviços cada vez mais confiáveis para seus clientes.

Existem ainda algumas estratégias pré-determinadas para prevenir ou mitigar o risco de interrupção de uma cadeia logística. De acordo com Chopra & Sodhi (2004), caso os atrasos sejam frequentes, uma estratégia de mitigação pode ser feita com bases históricas, ou ainda dimensionando sua capacidade e reservas de estoque. Armazenar o estoque como uma proteção contra a interrupção também faz sentido para produtos de commodities com baixos custos de manutenção e sem perigo de obsolescência.

Desta forma a empresa conseguirá aumentar o nível de serviço aos clientes. Porém, isso causará outros problemas, tais como o aumento de capital parado e o custo de se manter este produto estocado.

Além de todas as consequências descritas anteriormente, acidentes em ferrovias, principalmente em centros urbanos ou perto de rodovias, podem gerar perturbações no tráfego de veículos, consequentemente, formação de congestionamento. Portanto, para um determinado decisor, este pode ser um ponto negativo tanto para a sociedade quanto para a

imagem da organização perante a população. Segundo Garcez & de Almeida (2014), esta dimensão pode ser medida pelo tempo médio de espera em uma fila ou o número médio de veículos no congestionamento.

4.3 Proposta de Modelo de Avaliação Risco Multidimensional

Como já mencionado anteriormente, metodologias de apoio a decisão multicritério são adequadas para a avaliação de risco multidimensional por permitir a incorporação de vários critérios, as preferências do decisor, assim como a análise no contexto de incerteza. Esta seção apresenta um modelo de apoio a decisão multicritério para que se possa ser feita a avaliação de risco no transporte ferroviário de produtos perigosos de modo que incorpore as preferências do decisor quanto ao risco, ou seja, ser propenso, neutro ou avesso ao risco. A fim de ilustrar as etapas do modelo proposto por Almeida *et al.* (2015) e adaptado para o contexto do problema de transporte ferroviário de produtos perigosos, a estrutura é mostrada pela Figura 4.2.

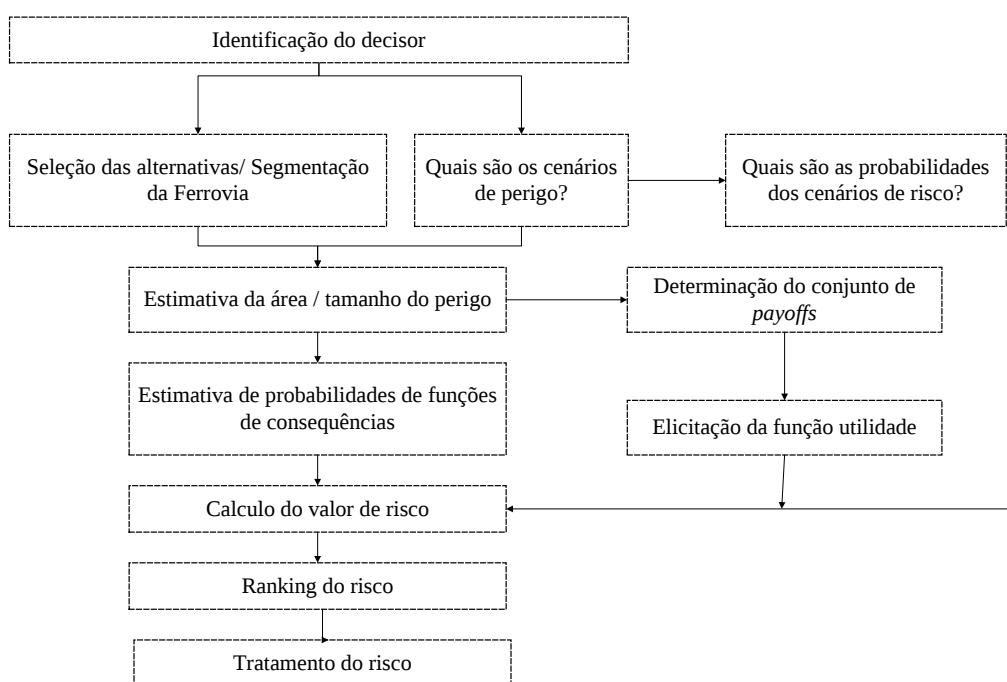


Figura 4.2 - Estrutura do modelo de decisão

Adaptado de Almeida *et al.* (2015)

O modelo proposto utiliza uma abordagem baseado em MAUT, que permite a incorporação das preferências do decisor no processo decisório. Este modelo, de acordo com de Almeida *et al.* (2015), tem origem da teoria decisão e fornece um protocolo estruturado,

com uma estrutura axiomática sólida, podendo incorporar vários critérios, além de incluir uma modelagem no contexto probabilístico, onde as incertezas estão inseridas.

4.3.1 Identificação do Decisor

Na primeira etapa é muito importante definir quem será o decisor relacionado ao problema de decisão. Esse decisor fornece um papel importante no processo decisório, pois será ele que estabelecerá suas preferências sobre cada uma das consequências. Essa é uma característica muito importante referente ao decisor. Segundo de Almeida (2013), o decisor será responsabilizado pelas consequências de sua decisão, ou seja, caso não seja satisfatória, o mesmo será cobrado por isso. O decisor pode ser apenas um indivíduo ou composto por um grupo de decisores. No contexto de ferrovias, o decisor pode ser o gerente da companhia férrea, analista de segurança ou ainda um gerente de projetos, para avaliar o risco antes mesmo da ferrovia entrar em funcionamento.

É importante salientar que o decisor deve estar familiarizado com o contexto da análise de risco, os cenários dos possíveis acidentes, além de estar ciente das várias dimensões de consequência que um acidente ferroviário possa trazer.

Além disso, o decisor pode ser auxiliado pelos analistas no processo decisório, que fornece um suporte metodológico na estruturação dos problemas. O analista pode ainda exercer o papel de facilitador, por exemplo, ao gerar ideias para incluir diversas alternativas. Outro ator importante no processo decisório é o especialista, ele é conhecedor do ambiente de estudo relacionado ao problema de decisão. Já o *stakeholder* tenta influenciar de alguma maneira o decisor, uma vez que são partes interessadas e são afetados pela decisão tomada. São chamados também de terceira parte.

Em algumas ocasiões, o decisor pode exercer o papel de especialista devido seu conhecimento técnico em relação as probabilidades de cenários acidentais, taxas de falhas, ou ainda o conhecimento do sistema a ser estudado (de ALMEIDA *et al.* 2015).

4.3.2 Identificação dos Cenários

Quanto a identificação dos cenários de perigo (θ), é necessário definir todos os possíveis cenários acidentais que podem ser resultados dos modos de falha. Estes cenários não definem as causas do modo de falha, mas são influenciados pelo tipo de modo de falha.

No contexto de transporte ferroviário podem existir vários cenários de perigo a serem analisados. Como visto na seção 3.3.2, os principais cenários que possam surgir em transporte ferroviário de produtos perigosos incluem: incêndios, descarrilamentos, colisões ou choque e

tombamento. Existem ainda cenários relacionados a atos de vandalismo, ou ainda a possibilidade de ataques de terroristas. Muitos destes incidentes são seguidos de uma série de eventos iniciais, podendo incluir, segundo Oggero *et al.* (2006), fogo, libertação, explosão e de nuvem de gás, dependendo do tipo de produto transportado.

Várias técnicas estão disponíveis para a identificação de cenários, como é o caso da árvore de eventos, *Failure Mode and Effect Analysis – FMEA*, *Hazard and Operability Study – HAZOP*, entre outras técnicas abordadas na seção 2.1.1. Essa etapa é uma parte crítica do processo de análise de risco, pois sem identificar as ameaças, não será possível a mitigação ou prevenção das mesmas, ou seja, dificilmente uma organização conseguirá diminuir ou evitar as consequências de um risco que não foi identificado.

4.3.3 Seleção das Alternativas

A linha ferroviária geralmente é composta por vários quilômetros de trilhos, fazendo com que a população exposta e os recursos variem, ou seja, ao longo da rota a composição do trem passa por várias cidades, pontes, túneis, passagens de nível, locais industriais e por pessoas que moram próximas a linha do trem.

Neste contexto, para uma avaliação de risco é preciso que sejam selecionados aqueles trechos que representam um potencial perigo para que seja realizado o cálculo do risco para cada um dos trechos selecionados. No modelo em questão estes trechos são chamados de alternativas. Portanto, uma solução é dividir a rota em pequenos segmentos, que segundo Reniers & Dullaert (2013), devem ser considerados homogêneos em relação a um número limitado de características pré-definidas. Reniers & Dullaert (2013) definem dois parâmetros a serem usados para a segmentação da rota, que podem ser aplicados em ferrovias, rodovias e dutos. Esses parâmetros estão relacionados aos locais de influência sobre as consequências sobre a população exposta, tais como, área industrial ou residencial, e parâmetros relacionados a infraestrutura, por exemplo, túneis ferroviários e pontes.

Para a seleção do conjunto de alternativas, os Métodos de Estruturação de Problemas, ou *Problem Structuring Methods (PSM)*, podem ser usados. De acordo com Mingers & Rosenhead (2004), os PSMs oferecem uma maneira de representar a situação que permitirá ao decisor esclarecer melhor o problema de decisão. Os métodos mais utilizados são: *Strategic Options Development and Analysis (SODA)*, *Soft Systems Methodology (SSM)*, *Strategic Choice Approach (SCA)* e *Value-Focused Thinking (VFT)*. O *Value-Focused Thinking (VFT)* ou Pensamento Focado no Valor, pode ajudar a definir as decisões alternativas que atendem

às necessidades e expectativas do grupo envolvido no processo de planejamento. O pensamento focado no valor descreve e ilustra conceitos e procedimentos para criar melhores alternativas para seus problemas de decisão, identificando oportunidades de decisão mais atraentes do que os problemas de decisão que você enfrenta e articulando e usando seus valores fundamentais para orientar e integrar suas atividades de tomada de decisão (CUNHA & COSTA MORAIS, 2014).

De acordo com de Almeida (2013), os demais métodos de estruturação de problemas enfatizam a escolha de alternativas já conhecidas ou que estão disponíveis para o decisor, ou seja, as alternativas são limitadas. Assim, o VFT conduz uma melhor decisão uma vez que o decisor pode encontrar problemas complexos e com objetivos ocultos e várias alternativas ainda não consideradas ou desconhecidas.

Ao final de todo do processo da avaliação de risco será produzida uma hierarquia e então serem priorizados de acordo com as preferências do decisor para que sejam realizadas ações preventivas ou mitigadoras.

4.3.4 Determinação das Probabilidades de Ocorrência dos Cenários

Após a identificação dos cenários e a seleção das alternativas, é preciso estimar a probabilidade dos cenários possíveis, com base no conhecimento *a priori*, que de acordo com de Almeida *et al.* (2015), um dos procedimentos para elicitare o conhecimento *a priori* é através do pensamento bayesiano, na qual é possível explicar esse conhecimento em uma função de probabilidade. Para mais informações sobre o procedimento é possível consultar Keeney & Von Winterfeldt (1991). Para a estimação das probabilidades acidentais é possível utilizar banco de dados acidentais passados, tais como apresentados pela CETESB/SP e ANTT.

4.3.5 Estimação da Área de Impacto

A próxima etapa é seguida pela estimação da área de exposição dado um cenário acidental. Só após a estimação da área de impacto para cada cenário e alternativa será possível estimar os possíveis impactos. De acordo com Liu *et al.* (2014), a área de impacto e a forma com que há a dispersão do acidente é dependente de uma série de fatores tais como propriedades químicas, quantidade liberada, taxa de liberação, condições meteorológicas e terreno local.

Há diferentes maneiras de se calcular as formas geométricas de um acidente em torno de um segmento de rota, formas estas que podem ser banda de largura fixa, circular, retangular

ou em forma de elipse (ERKUT *et al.* 2007). O círculo é a forma mais comum para a aproximação de uma zona de impacto. De acordo com Kara *et al.* (2003), ao mover o círculo ao longo da rota entre dois nós é possível obter uma aproximação de largura fixa, porém, o autor reitera que o raio depende do tipo de substância, no entanto pode-se determinar o raio considerando a distância de evacuação, isto é, a zona inicial de isolamento, por exemplo, um raio de 0,8 km para produtos inflamáveis e 1,6 km para explosivos. Segundo Erkut *et al.* (2007), neste tipo de modelo a hipótese é de que cada indivíduo dentro da zona de impacto será igualmente afetado e ninguém fora dessa área será afetado.

O modelo de forma em elipse com base no Modelo de Pluma Gaussiana (GPM) traz uma melhor aproximação da área em relação as outras três formas geométricas, sendo comumente utilizado para a obtenção da área de impacto quando o tipo de produto pode ser aerotransportado (tais como cloro, propano e amônia). Segundo Erkut *et al.* (2007), o modelo determina a distribuição espacial do nível de concentração tóxica, decorrentes de tal liberação, obtida pela Equação (4.11):

$$C(x, y, z, h_e) = \frac{Q}{2\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right) * \left[\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z-h_e}{\sigma_z}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z+h_e}{\sigma_z}\right)^2\right) \right] \quad (4.11)$$

onde C é o nível de concentração (massa por unidade de volume- $\mu g/m^3$ ou partes por milhão - ppm), x é a distância a partir da fonte (m), y é a distância perpendicular da fonte (m), z é a elevação do ponto de destino (m), h_e é a elevação da fonte (m), Q é a taxa de libertação do poluente (taxa de emissão de massa - g/s ou taxa de volume volumétrico - m^3 / s), μ é velocidade média do vento (m/s), σ_y e σ_z são os parâmetros de dispersão nas direções y e z (m). Na dispersão de produtos perigosos resultantes de acidentes de trânsito, é geralmente assumido que a fonte está no solo (isto é, $h_e = 0$), e o interesse é no nível de concentração no solo (isto é, $z = 0$). Portanto, obtém-se:

$$C(x, y, z, h_e) = \frac{Q}{2\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right) \quad (4.12)$$

4.3.6 Determinação do Conjunto de *Payoffs*

A etapa de determinação do conjunto de *payoffs*, de acordo com de Almeida *et al.* (2015), consiste em um conjunto de consequências multidimensionais que envolve os riscos. Para cada dimensão de consequência considerado, deverão ser definidos os impactos máximos (perdas) resultantes de um acidente. O termo *payoff* refere-se a uma recompensa ou

a uma compensação, que pode ser avaliada em termos monetários ou em termos de utilidade (LINS & DE ALMEIDA, 2012).

Na literatura, várias dimensões foram consideradas: a segurança humana, financeira, ambiental, operacional, entre outras (Brito & de Almeida, 2009; Alencar & de Almeida, 2010, Lins & de Almeida, 2012; Garcez & de Almeida, 2014). Neste estudo em específico, a avaliação das consequências será abordada através das seguintes dimensões: dimensão de consequência humana (H), ambiental (E), financeira (F) e logística (L). Cada uma das dimensões pode ser tratada de formas diferentes.

A dimensão humana (H), geralmente é tratada em número de mortes ou lesões causadas por um acidente. Como visto, pode ser obtida pela curva F-N, ou pela probabilidade de haver ferimentos ou mortes, através da função PROBIT, como exemplificada na seção 0.

A dimensão ambiental (E), ganhou notoriedade nos últimos anos. Há vários índices para avaliar a consequência ambiental, dentre eles está a avaliação da diversidade ecológica, medido pelo índice de *Margalef* (D_{mg}), que combina o número de espécies registrado (S) com o número total de indivíduos (N).

A dimensão financeira (F) reúne os vários gastos provenientes de acidentes ferroviários, tais como o custo para limpar o produto derramado, o custo de substituir os vagões por outros mais resistentes a rupturas (seção 4.2.3). Há, também, outras despesas ligadas a multas estabelecidas pelos órgãos reguladores e pelo Ministério Público. Além disso, é possível considerar as despesas financeiras para compensar danos humanos ou fatalidades (indenizações).

A dimensão de consequência logística (L) é caracterizada por perturbações que possam ocorrer com o acidente ferroviário, onde a interrupção de fornecimento é a principal preocupação do decisor. A interrupção de fornecimento pode causar grandes consequências para a empresa transportadora, pois a ocorrência de um acidente no transporte ferroviário poderá atrasar o fornecimento do produto, como também, passar uma imagem distorcida quanto a segurança do modal perante a população e clientes e potenciais da empresa. Com isso, a empresa poderá perder clientes, o que impactará diretamente a demanda por serviços prestados.

4.3.7 Elicitação da Função Utilidade

Após a determinação do conjunto de *payoffs*, a próxima etapa se dá através da elicitación da função utilidade multiatributo baseada em MAUT. A abordagem baseada em MAUT

utiliza a ideia de compensação entre os critérios, implicando em uma função que visa agregar todos os critérios em uma única função (de ALMEIDA *et al.* 2015). Esta função utilidade irá expressar as preferências do decisor conforme o problema em questão.

Para a elicitação da função utilidade pode-se consultar Keeney & Raiffa (1993), na qual os autores apresentam uma metodologia para a elicitação da função utilidade feita em cinco etapas. A aplicação desta teoria sugere um processo que envolve entrevistas entre o analista e o decisor para que sejam levantadas as preferências do decisor em relação a cada um dos critérios.

O modelo em questão obedece a condição de que a função de utilidade é independente aditivamente. Só é possível expressar a utilidade multiatributo na forma aditiva se os atributos forem mutualmente independentes em utilidade e é constatada a independência aditiva entre os atributos. Mas, o contrário pode não ser verdadeiro, ou seja, se constatada a independência mutua em utilidade entre os critérios, não é possível afirmar que se tenha uma independência aditiva.

A função pode ser aditiva quando há uma independência aditiva entre os atributos, o que pode facilitar o trabalho na obtenção da utilidade total, pois permite adicionar as contribuições individuais dos vários atributos, ou seja, consideram-se que as consequências humanas, ambientais, financeiras e logísticas utilizadas neste trabalho, ocorram de maneira independente, podendo assim ser estimadas de forma independente. Outra condição que precisa ser avaliada é a independência em probabilidade. De acordo com de Almeida *et al.* (2015), a função de utilidade aditiva é obtida pela seguinte equação:

$$u(h, e, f, l) = K_h u_h(h) + K_e u_e(e) + K_f u_f(f) + K_l u_l(l) \quad (4.13)$$

onde $K_h + K_e + K_f + K_l = 1$ são as constantes de escalas e $u(x)$ representa a função utilidade para cada uma das dimensões consideradas.

Por fim, deve-se elicitar as constantes de escala K_h , K_e , K_f e K_l para integrar as funções utilidade já determinadas e compor a função utilidade multiatributo. As constantes de escalas, erroneamente chamadas de “pesos”, está associada a taxa de substituição, que traduz a ideia de compensação de ganho em um critério, quando se perde em outro (DE ALMEIDA, 2013).

Uma forma de estimar as constantes de escala é através dos procedimentos de *trade-off* dos valores de consequências definidos em Keeney & Raiffa (1993). Porém, Edwards & Barron (1994) consideram este procedimento de *trade-off* difícil de se aplicar. Propuseram então, um método que usa o procedimento de pesos por *swing*. Este procedimento foi

incorporado ao método *Simple Multi-attribute Rating Technique* – SMART e SMARTER, considerando funções valor lineares para a avaliação intracritério, ou seja, consiste na avaliação de cada alternativa para cada critério. A função valor de cada para cada elemento é construída com base nas consequências (*payoffs*) a serem obtidas. É possível consultar Edwards & Barron (1994) para mais informações sobre o procedimento de elicitação das constantes de escalas.

4.3.8 Cálculo do Valor do Risco

De acordo com as definições de risco abordadas anteriormente, o risco pode ser definido como uma combinação dos cenários e a probabilidade de ocorrência dos mesmos. Os resultados obtidos na etapa de estimação da área de impacto serão utilizados para obtenção das probabilidades de cada um dos cenários de perigo identificados, através de uma função de probabilidade de consequência $P(c_{1,...,m}|\theta_j, a_i)$, onde θ_j são os cenários, c é a consequência e a_i as alternativas.

Porém, Garcez & de Almeida (2014) exemplificam que em alguns casos quando um determinado cenário acidental ocorre, para algumas dimensões a consequência ocorre com certeza, sob uma visão determinística. Como exemplo, é possível citar o índice de *Margalef* (D_{mg}) para a determinação da consequência a diversidade ambiental, combinando o número de espécies registrado com o número total de indivíduos.

Utilizando os conceitos de MAUT e teoria da decisão, uma vez que tenha assumido a função utilidade aditiva e a independência de probabilidade, a medida do risco segundo de Almeida *et al.* (2015), é expressa pela Equação (4.14):

$$r(a_i) = \sum_{k=1}^m \left(\sum_{\theta} \pi(\theta_j) \left(- \int_{c_r} u(c_r) P(c_r | \theta_j, a_i) dc_r \right) \right) + (-1)\pi(\theta_N) \quad (4.14)$$

onde $r(a_i)$ representa o risco de cada segmento de ferrovia a_i , dada a ocorrência do cenário acidental θ_j ; $\pi(\theta_j)$ representa a probabilidade da ocorrência do cenário acidental; k representa as diversas dimensões de consequência consideradas (humana, ambiental, financeira e logística). A função perda é a negativa da função utilidade, dada por $-\int_{c_r} u(c_r) P(c_r | \theta_j, a_i) dc_r$. A probabilidade do estado da natureza é dada por $\pi(\theta_N)$, que representa a não ocorrência do cenário acidental, ou seja, o cenário de operação normal de transporte.

4.3.9 *Ranking* do Risco e Tratamento do Risco

Quando é preciso alocar recursos, uma abordagem que consiga fazer um ordenamento dos riscos é mais adequada, desta forma o decisor conseguirá prevenir e mitigar o risco conforme aqueles que representarem o maior valor. Sugere-se então a elaboração de um ranking das alternativas, partindo do pressuposto de que alguns riscos são de certa forma considerados insignificantes para o decisor. Com o ranking será possível identificar as alternativas críticas que exigem mais atenção por parte do decisor.

Partindo desta informação, o decisor poderá alocar seus esforços de forma correta para que medidas preventivas ou mitigatórias sejam tomadas em relação a cada uma das alternativas de acordo com a sua estrutura de preferência.

O tratamento do risco corresponde a todas as estratégias necessárias em resposta ao risco, em que são selecionadas aquelas mais eficazes e viáveis para que o risco seja levado a patamares aceitáveis, de acordo com a preferência do decisor. Tratamento dos riscos então altera a magnitude e a probabilidade de consequências.

É preciso também, avaliar se novos riscos são gerados devido as ações implementadas, pois cada ação realizada na alternativa selecionada para a avaliação do risco pode gerar novas consequências, alterando a probabilidade de ocorrência de um dado cenário muitas vezes não desejada pelo decisor, ou ainda aumentar um risco em detrimento de outro. Este processo é chamado de monitoramento do risco. Assim, as metodologias já existentes de gestão são melhoradas ou ainda novos sistemas de controles do risco podem ser desenvolvidos e implementados pelos analistas de risco.

Vale lembrar que o modelo pode ser adaptado conforme as preferências do decisor e o problema de decisão em questão, sendo aqui apresentadas apenas algumas formas de considerar cada uma das dimensões descritas. O intuito da proposta do modelo é generalizar a visão multidimensional das consequências em diversos contextos que o transporte ferroviário de produtos perigosos está inserido.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Mesmo sendo um transporte confiável, o transporte ferroviário não é isento de acidentes, o que vem a gerar várias consequências negativas a população, meio ambiente e a própria organização transportadora devido as características do modal ferroviário e as propriedades químicas dos produtos perigosos.

Porém, como exemplificado, uma avaliação de risco tem se mostrado mais eficiente quando as consequências não são limitadas apenas a uni-dimensionalidade das consequências, ou seja, considerando apenas o impacto aos seres humanos, meio ambiente, financeiro ou logística separadamente, mas sim de forma que a visão multidimensional da consequência seja incorporada no gerenciamento de risco das organizações para que se tenha um diagnóstico mais amplo e preciso, uma vez que a visão unidimensional pode não ser suficientemente abrangente para a avaliação de risco no contexto de transportes.

O presente trabalho veio a contribuir para o desenvolvimento da gestão de risco no transporte ferroviário de produtos perigosos com a proposição de um modelo de avaliação multidimensional dos riscos com a inclusão da dimensão de consequência logística da qual não havia sido considerada na literatura verificada.

O modelo foi construído a partir da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT). A escolha do MAUT, dentre as várias disponíveis, deve-se ao fato da metodologia apresentar um protocolo bem estruturado, apoiado por uma estrutura axiomática sólida para decisões que envolvem vários critérios de decisão. O modelo agrega ainda a estrutura de preferência do decisor no conjunto de *payoffs* através de uma função utilidade, e sua atitude quanto ao risco, seja ela avessa, neutra ou propensa, em um contexto probabilístico (incerteza) em que as decisões sobre transporte ferroviário está inserido.

Para cada uma das situações apresentadas o decisor poderá ter uma gama de escolha para a avaliação das consequências em decorrência de um acidente ferroviário, por exemplo, o decisor poderá avaliar a dimensão humana em função da probabilidade de haver morte ou feridos, a dimensão financeira em função dos custos de se fazer a limpeza do produto derramado em solos e águas subterrâneas ou pelo custo de substituir material que reveste o vagão tanque por outro de maior resistência, o que pode evitar o lançamento de produtos perigosos, a dimensão ambiental pelo índice de *Margalef* ou ainda a dimensão de consequência logística pela probabilidade de perda de clientes que utilizam o sistema ferroviário para o transporte de produtos perigosos.

Portanto, podem existir múltiplos objetivos ou atributos e dimensões de risco que as organizações desejam levar em consideração, ficando a critério das mesmas a sua utilização conforme suas preferências e a problemática a ser estudada.

Quanto a problemática, uma vez que a organização precise alocar recursos para mitigação e prevenção do risco de acidentes ferroviários e suas consequências, a problemática de ordenação dos riscos de forma hierárquica torna-se uma opção viável, pois através da ordenação dos trechos (alternativas) da linha férrea o decisor poderá alocar os recursos conforme o trecho que apresentar o maior risco. Desta forma, o modelo proposto vem a ser uma importante ferramenta de apoio ao decisor na priorização das alternativas que são consideradas críticas.

Como sugestão de trabalhos futuros recomenda-se a inclusão de outras dimensões de consequências a serem analisadas, tais como a dimensão operacional e impacto sobre o trânsito, uma vez que as ferrovias tendem a cruzar as cidades pelas quais elas passam, aumentando a exposição da população.

Sugere-se ainda a escolha de um produto perigoso específico, tais como combustíveis e líquidos inflamáveis, ou outro produto de maior ocorrência de acordo com as estatísticas para a avaliação de risco ou o problema de decisão em questão. Para esta escolha, deve-se analisar a forma com que o produto é liberado, pois, dependendo do tipo de produto, em contato com o ar ou solo, o produto poderá ser aerotransportado devido a sua composição química, alterando assim a área e o impacto para cada uma das dimensões escolhidas. Desta forma, os cenários de consequências também sofrerão modificações.

Uma revisão das funções de consequências pode-se fazer necessária, de acordo com as preferências do decisor, ou ainda, para uma maior compreensão dos riscos no transporte de produtos perigosos, analisar multidimensionalmente a intermodalidade entre o transporte ferroviário e rodoviário em todo o processo da movimentação ou no momento do transbordo, devido a sua representatividade neste tipo de atividade.

Por fim, sugere-se checar as suposições de independência preferencial entre as dimensões (atributos) propostas, com o intuito de constatar a independência aditiva para que o modelo aditivo possa ser usado para o modelo proposto, tendo em vista que o trabalho supôs que os atributos possuem independência aditiva.

Como fator limitante desta pesquisa deve-se ao fato do Brasil ainda não possuir uma base sólida de dados detalhados sobre acidentes no transporte de produtos perigosos no âmbito nacional, onde poucas instituições, tais como a Agência Nacional de Transportes –

ANTT e a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB/SP, trazem alguns dados de acidentes, porém, pouco detalham as causas dos acidentes, o meio ambiente envolvido e as consequências de tais acidentes ferroviários no transporte de produtos perigosos, sejam eles ambientais, econômicos, humanas e/ou logísticos. Esta carência de dados faz com que o avanço em pesquisa e desenvolvimento de metodologias de riscos aplicadas ao contexto brasileiro sejam escassas e assim, o desenvolvimento do modal ferroviário mesmo com tantos benefícios operacionais e econômicos também fiquem limitados, fazendo com que perca competitividade.

REFERÊNCIAS

- ABT, E. et al. Science and decisions: Advancing risk assessment. **Risk Analysis**, v. 30, n. 7, p. 1029–1036, 2010.
- ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. Assigning priorities to actions in a pipeline transporting hydrogen based on a multicriteria decision model. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 8, p. 3610–3619, 2010.
- ANDERSSON, S.-E. Safe transport of dangerous goods: road, rail or sea? A screening of technical and administrative factors. **European Journal of Operational Research**, v. 75, n. 3, p. 499–507, 1994.
- ANDREWS, J. D.; DUNNETT, S. J. Event-tree analysis using binary decision diagrams. **Reliability, IEEE Transactions on**, v. 49, n. 2, p. 230–238, 2000.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES FERROVIÁRIOS - ANTF. **Balanço do Transporte Ferroviário de Cargas 2012**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://sinop.unemat.br/site_antigo/prof/foto_p_downloads/fot_1040501_01_balanco_ttransp_febboviabio_2012_antf_pdf.pdf>.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES - ANTT. **Acidentes Ferroviários no Subsistema Ferroviário Federal no ano de 2013**, 2014. Disponível em: <www.antt.gov.br/html/objects/_downloadblob.php?cod_blob=14684>
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES - ANTT. **Competências da Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/D4130.htm>. Acesso em: 10 out. 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES - ANTT. **RESOLUÇÃO Nº 420 Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT**, 2004.
- ARDJMAND, E. et al. Applying genetic algorithm to a new bi-objective stochastic model for transportation, location, and allocation of hazardous materials. **Expert Systems with Applications**, v. 51, p. 49–58, 2016.
- ASSADIPOUR, G.; KE, G. Y.; VERMA, M. Planning and managing intermodal transportation of hazardous materials with capacity selection and congestion. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 76, p. 45–57, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 31000: Gestão de riscos - Princípios e diretrizes**. [s.l.: s.n.].
- AVEN, T. **Risk Analysis**. 1. ed. [s.l.] John Wiley, 2008a. v. 1
- AVEN, T. On how to define, understand and describe risk. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 95, n. 6, p. 623–631, 2010.
- AVEN, T. On the new ISO guide on risk management terminology. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 96, n. 7, p. 719–726, 2011.

AVEN, T. **Risk Analysis**. 2^a Edição ed. [s.l.] Jonhn Wiley, 2015.

AVEN, T.; RENN, O. On the risk management and risk governance of petroleum operations in the Barents Sea area. **Risk analysis: an official publication of the Society for Risk Analysis**, v. 32, n. 9, p. 1561–75, set. 2012.

BAGHERI, M.; VERMA, M.; VERTER, V. Transport mode selection for toxic gases: Rail or road? v. 34, n. 1, p. 168–186, jan. 2014.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos - 5.ed.: Logística Empresarial**. [s.l.] Bookman, 2009.

BARKAN, C. P. L.; GLICKMAN, T.; HARVEY, A. **Benefit-cost evaluation of using different specification tank cars to reduce the risk of transporting environmentally sensitive chemicals** *Transportation Research Record*, 1991.

BRITO, A. J.; DE ALMEIDA, A. T. Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 94, n. 2, p. 187–198, 2009.

BRITO, A. J.; DE ALMEIDA, A. T.; MOTA, C. M. M. A multicriteria model for risk sorting of natural gas pipelines based on ELECTRE TRI integrating Utility Theory. **European Journal of Operational Research**, v. 200, n. 3, p. 812–821, fev. 2010.

BUBBICO, R. et al. Risk management of road and rail transport of hazardous materials in Sicily. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 19, n. 1, p. 32–38, 2006a.

BUBBICO, R. et al. Preliminary study on the transport of hazardous materials through tunnels. **Accident Analysis & Prevention**, v. 41, n. 6, p. 1199–1205, 2009a.

BUBBICO, R.; DI CAVE, S.; MAZZAROTTA, B. Risk analysis for road and rail transport of hazardous materials: a simplified approach. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 17, n. 6, p. 477–482, nov. 2004.

BUBBICO, R.; FERRARI, C.; MAZZAROTTA, B. Risk analysis of LPG transport by road and rail. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 13, n. 1, p. 27–31, 2000.

BYRD, D. M.; COTHERN, C. R. **Introduction to Risk Analysis: A Systematic Approach to Science-based Decision Making**. [s.l.] Government Institutes, 2000.

CARAMIA, M.; DELL'OLMO, P. **Chapter 2: Multi-objective Optimization**. [s.l.: s.n.].

CARPENTER, R. A. Risk Assessment. **Impact Assessment**, v. 13, n. 2, p. 153–187, 1995.

CARTER, D. A.; HIRST, I. L. “Worst case” methodology for the initial assessment of societal risk from proposed major accident installations. **Journal of Hazardous Materials**, v. 71, n. 1–3, p. 117–128, 2000.

CAVINATO, J. L. Supply chain logistics risks. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 34, n. 5, p. 383–387, jun. 2004.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CESTEB. **Gráfico**

CETESB/SP Atividades. Disponível em: http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/emergencia/est_atividade.php. Acesso em: 26 set. 2016a.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CESTEB. RELATÓRIO FERROVIAS. Disponível em: <http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/emergencia/relatorio.php>. Acesso em: 26 set. 2016b.

CHENG, J.; WEN, C. Risk assessment model approach for dangerous goods transported by railway. **Journal of Transportation Security**, v. 4, n. 4, p. 351–359, 2011.

CHIOU, S. A bi-objective bi-level signal control policy for transport of hazardous materials in urban road networks. **Transportation Research Part D**, v. 42, p. 16–44, 2016a.

CHOPRA, S.; SODHI, M. S. **Managing Risk to Avoid Supply-Chain Breakdown.** Disponível em: <http://sloanreview.mit.edu/article/managing-risk-to-avoid-supplychain-breakdown/>. Acesso em: 26 jun. 2016.

CNT. Pesquisa CNT de Ferrovias 2015. – Brasília : CNT, 2015. [s.l.: s.n.]. Disponível em: http://issuu.com/transporteatual/docs/pesquisa_cnt_de_ferrovias_2015_web__fbf36ee6e77afe/1?e=2235293/32044358.

COHRSEN, J. J.; COVELLO, V. T. **Risk Analysis: A Guide to Principles and Methods for Analyzing Health and Environmental Risks.** [s.l.] DIANE Publishing Company, 1999.

COZZANI, V. et al. Hazmat transport: a methodological framework for the risk analysis of marshalling yards. **Journal of hazardous materials**, v. 147, n. 1–2, p. 412–423, 2007.

COZZANI, V.; ANTONIONI, G.; SPADONI, G. Quantitative assessment of domino scenarios by a GIS-based software tool. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 19, n. 5, p. 463–477, 2006.

CUNHA, A. A. R.; COSTA MORAIS, D. **Analysis of problem structuring methods to improve decisions in environmental planning.** 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). **Anais...IEEE**, out. 2014Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6973922/>

DE ALMEIDA, A. T. **Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério.** [s.l.] ATLAS, 2013.

DE ALMEIDA, A. T. et al. **Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis.** Cham: Springer International Publishing, 2015a. v. 231

DE ALMEIDA, A. T. et al. A systematic literature review of multicriteria and multi-objective models applied in risk management. **IMA Journal of Management Mathematics**, p. dpw021, 2016.

DE ALMEIDA, A. T.; BOHORIS, G. A. Decision theory in maintenance decision making. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 1, n. 1, p. 39–45, mar. 1995.

DEHE, B.; BAMFORD, D. Development, test and comparison of two Multiple Criteria

Decision Analysis (MCDA) models: A case of healthcare infrastructure location. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 19, p. 6717–6727, nov. 2015.

DIAMANTIDIS, D. .; ZUCCARELLI, F. .; WESTHÄUSER, A. . Safety of long railway tunnels. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 67, n. 2, p. 135–145, 2000.

DIAS, S. C. Planejando estudos de diversidade e riqueza: uma abordagem para estudantes de graduação. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, v. 26, n. 4, p. 373–379, 2004.

DUAN, Y. et al. A risk matrix analysis method based on potential risk influence: A case study on cryogenic liquid hydrogen filling system. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 102, n. 171, p. 277–287, 2016.

EDWARDS, W.; BARRON, F. H. **SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement** **Organizational Behavior and Human Decision Processes**, 1994. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0749597884710879>>

ERKUT, E.; INGOLFSSON, A. Transport risk models for hazardous materials: Revisited. **Operations Research Letters**, v. 33, n. 1, p. 81–89, 2005.

ERKUT, E.; TJANDRA, S. A.; VERTER, V. Chapter 9 Hazardous Materials Transportation. In: **Handbooks in Operations Research and Management Science**. [s.l.: s.n.]. v. 14p. 539–621.

EVANS, A. W.; ADDISON, J. D. Interactions between rail and road safety in Great Britain. **Accident; analysis and prevention**, v. 41, n. 1, p. 48–56, 2009.

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

FERREIRA, R. J. P.; DE ALMEIDA, A. T.; CAVALCANTE, C. A. V. A multi-criteria decision model to determine inspection intervals of condition monitoring based on delay time analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 94, n. 5, p. 905–912, 2009.

GANDINI, P. et al. Assesment of Areas Exposed to Damage by Dangerous Goods Transportation: Application of Analytic Hierarchy Process Method for Land Covers Weighing. **IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC**, v. 2015–Octob, n. 1, p. 2551–2556, 2015.

GARCEZ, T. V; DE ALMEIDA, A. T. Multidimensional risk assessment of underground electricity distribution systems based on MAUT. **Safety, Reliability and Risk Analysis: Beyond the Horizon**, v. 29, n. 2, p. 2009–2017, 2014.

GEYGER, R. Menos frequentes, porém mais severos, acidentes com cargas perigosas em ferrovias exigem grande preparação para seu gerenciamento. **Revista Emergência**, 2015.

GLICKMAN, T. Rerouting railroad shipments of hazardous materials to avoid populated areas. **Accident Analysis & Prevention**, v. 15, n. 5, p. 329–335, 1983.

GLICKMAN, T. S. .; ERKUT, E. .; ZSCHOCKE, M. S. . The cost and risk impacts of

rerouting railroad shipments of hazardous materials. **Accident Analysis and Prevention**, v. 39, n. 5, p. 1015–1025, 2007.

GOMES, L.; FERNANDES, JOÃO ERIK DE MATTOS, MELLO, J. C. C. . S. A fuzzy stochastic approach to the multicriteria selection of an aircraft for regional chartering. **Journal of Advanced Transportation**, v. 47, n. June 2010, p. 512–525, 2011.

GUARASCIO, M. et al. Risk analysis and reliability based design in tunnel fire safety. **WIT Transactions on the Built Environment**, v. 108, p. 575–584, 2009.

HE, G. et al. Environmental risks of high-speed railway in China: Public participation, perception and trust. **Environmental Development**, v. 14, p. 37–52, 2015.

HØJ, N. P.; KRÖGER, W. Risk analyses of transportation on road and railway from a European Perspective. **Safety Science**, v. 40, n. 1–4, p. 337–357, 2002.

HU, S.-R.; WU, K.-H. Accident Risk Analysis and Model Applications of Railway Level Crossings. **2008 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems**, p. 687–692, 2008.

JIANG, Y. et al. A Multimodal Location and Routing Model for Hazardous Materials Transportation based on Multi-commodity Flow Model. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 138, p. 791–799, 2014.

KARA, B. Y.; ERKUT, E.; VERTER, V. Accurate calculation of hazardous materials transport risks. **Operations Research Letters**, v. 31, n. 4, p. 285–292, jul. 2003.

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. **Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs**. [s.l.] Cambridge University Press, 1993.

KEENEY, R. L.; VON WINTERFELDT, D. Eliciting probabilities from experts in complex technical problems. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 38, n. 3, p. 191–201, 1991.

KHAN, F. I.; HADDARA, M. M. Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 16, n. 6, p. 561–573, nov. 2003.

KOBBACY, K. A. H.; MURTHY, D. N. P. **Complex System Maintenance Handbook**. [s.l.] Springer London, 2008.

KONTOGIANNIS, T.; LEOPOULOS, V.; MARMARAS, N. A comparison of accident analysis techniques for safety-critical man-machine systems. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 25, n. 4, p. 327–347, 2000.

KRISHNASAMY, L.; KHAN, F.; HADDARA, M. Development of a risk-based maintenance (RBM) strategy for a power-generating plant. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 18, n. 2, p. 69–81, mar. 2005.

LACHANCE, J.; TCHOUELEV, A.; ENGEBO, A. Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 3, p. 2381–2388, 2011.

LANDUCCI, G. et al. HazMat transportation risk assessment: A revisitation in the perspective of the Viareggio LPG accident. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 2016.

LEONELLI, P.; BONVICINI, S.; SPADONI, G. Hazardous materials transportation: A risk-analysis-based routing methodology. **Journal of Hazardous Materials**, v. 71, n. 1–3, p. 283–300, 2000.

LI, Z.; HUANG, H.; XUE, Y. Cut-slope versus shallow tunnel: Risk-based decision making framework for alternative selection. **Engineering Geology**, v. 176, p. 11–23, 2014.

LINS, P. H. C.; DE ALMEIDA, A. T. Multidimensional risk analysis of hydrogen pipelines. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 18, p. 13545–13554, 2012.

LIU, B.; GHAZEL, M. Model-Based Diagnosis of Multi-track Level Crossing Plants. v. 17, n. 2, p. 1–11, 2015.

LIU, X.; SAAT, M. R.; BARKAN, C. P. L. Integrated risk reduction framework to improve railway hazardous materials transportation safety. **Journal of Hazardous Materials**, v. 260, p. 131–140, 2013.

LIU, X.; SAAT, M. R.; BARKAN, C. P. L. Probability analysis of multiple-tank-car release incidents in railway hazardous materials transportation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 276, p. 442–451, 2014.

MACHARIS, C.; BONTEKONING, Y. . Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review. **European Journal of Operational Research**, v. 153, n. 2, p. 400–416, 2004.

MANSUR, C.; PARREIRAS, M. **Terceiro acidente com trem em menos de 10 dias acende sinal amarelo nas ferrovias.** Disponível em: <http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2016/01/27/interna_gerais,728677/terceiro-acidente-com-trem-em-menos-de-10-dias-acende-sinal-amarelo-na.shtml>.

MARHAVILAS, P. K.; KOULOURIOTIS, D. E. A risk-estimation methodological framework using quantitative assessment techniques and real accidents' data: Application in an aluminum extrusion industry. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 21, n. 6, p. 596–603, 2008.

MARHAVILAS, P. K.; KOULOURIOTIS, D.; GEMENI, V. Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 24, n. 5, p. 477–523, 2011.

MATANOVIC, D. **Risk Analysis for Prevention of Hazardous Situations in Petroleum and Natural Gas Engineering.** [s.l.] IGI Global, 2013.

MILAZZO, M. . et al. HazMat transport through Messina town: from risk analysis suggestions for improving territorial safety. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 15, n. 5, p. 347–356, 2002.

MILAZZO, M. F. et al. A study of land transport of dangerous substances in Eastern Sicily. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 23, n. 3, p. 393–403, 2010.

MINGERS, J.; ROSENHEAD, J. Problem structuring methods in action. **European Journal of Operational Research**, v. 152, n. 3, p. 530–554, fev. 2004.

MOTA, C. M. DE M.; DE ALMEIDA, A. T.; ALENCAR, L. H. A multiple criteria decision model for assigning priorities to activities in project management. **International Journal of Project Management**, v. 27, n. 2, p. 175–181, 2009.

MOURA CARNEIRO, F. O.; BARBOSA ROCHA, H. H.; COSTA ROCHA, P. A. Investigation of possible societal risk associated with wind power generation systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 30–36, 2013.

OGGERO, A. et al. A survey of accidents occurring during the transport of hazardous substances by road and rail. **Journal of Hazardous Materials**, v. 133, p. 1–7, 2006.

OJIMA, A. L. R. DE O. A OTIMIZAÇÃO LOGÍSTICA DE COMMODITIES AGRÍCOLAS : APLICAÇÃO DE UM MODELO DE EQUILÍBRIO ESPACIAL. **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - SBPO**, n. 1995, 2004.

PIANKA, E. R. **Evolutionary Ecology**. [s.l.] Eric R. Pianka, 2011.

PORTAL PRODUTOS PERIGOSOS. **Transporte de Produtos Perigosos**. Disponível em: <http://www.produtosperigosos.com.br/materias.php?cd_secao=56&codant=&friurl=>. Acesso em: 10 maio. 2016a.

PORTAL PRODUTOS PERIGOSOS. **Transporte de Produtos Perigosos deve atender às novas Normas Brasileiras**. Disponível em: <http://www.produtosperigosos.com.br/materias.php?cd_secao=67&codant=&friurl=-Normas->. Acesso em: 10 maio. 2016b.

PURDY, G. Risk analysis of the transportation of dangerous goods by road and rail. **Journal of Hazardous Materials**, v. 33, n. 2, p. 229–259, 1993.

QIXUN, F. et al. Summarize of Risk management Research in Subway tunnel engineering. 2010.

READ, G. J. M. et al. Walking the line: Understanding pedestrian behaviour and risk at rail level crossings with cognitive work analysis. **Applied ergonomics**, 27 out. 2015.

RENIERS, G. L. L. et al. Developing an external domino accident prevention framework: Hazwim. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 18, n. 3, p. 127–138, 2005.

RENIERS, G. L. L. L.; DULLAERT, W. A method to assess multi-modal Hazmat transport security vulnerabilities: Hazmat transport SVA. **Transport Policy**, v. 28, p. 103–113, jul. 2013.

RIMKEVIČIUS, S. et al. HAZOP application for the nuclear power plants decommissioning projects. **Annals of Nuclear Energy**, v. 94, p. 461–471, 2016.

SAAT, M. R. . et al. Environmental risk analysis of hazardous material rail transportation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 264, p. 560–569, 2014.

SACCOMANNO, F. F.; SHORTREED, J. H. Hazmat transport risks: Societal and individual perspectives. **Journal of Transportation Engineering**, v. 119, n. 2, p. 177–188, 1993.

SALA, C. et al. Study of a Nimble Model to Evaluate the Effects of a Gasoline Fire in a Road Tunnel. v. 36, p. 337–342, 2014.

SAPORI, E. .; SCIUTTO, M. .; SCIUTTO, G. . D. **A quantitative approach to risk management in critical infrastructures**. Transportation Research Procedia. **Anais...Elsevier**, 2014Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84959345434&partnerID=40&md5=289a93c9708f080ac10a9a63ba86f72f>>. Acesso em: 29 jul. 2016

SCHAEFFER, D. J.; WERTH, C. J.; MINSKER, B. S. Environmental Risk Analysis of Chemicals Transported in Railroad Tank Cars. **Methodology**, p. 1–9, 1995.

SCHWEITZER, L. Environmental justice and hazmat transport: A spatial analysis in southern California. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 11, n. 6, p. 408–421, 2006.

SENNA, L. A. D. S. The influence of travel time variability on the value of time. **Transportation**, v. 21, n. 2, p. 203–228, 1994.

SHAPIRA, Z. RISK TAKING: A MANAGERIAL PERSPECTIVE. **Journal of Behavioral Decision Making**, v. 9, n. 2, p. 148–149, 1995.

SHEFFI, Y. **A Supply Chain View of the Resilient Enterprise**. Disponível em: <<http://sloanreview.mit.edu/article/a-supply-chain-view-of-the-resilient-enterprise/>>.

SODHI, M. S.; SON, B.-G.; TANG, C. S. Researchers' perspectives on supply chain risk management. **Production & Operations Management**, v. 21, n. 1, p. 1–13, 2012.

SRINIVASAN, R.; VENKATASUBRAMANIAN, V. Automating HAZOP analysis of batch chemical plants: Part II. Algorithms and application. **Computers and Chemical Engineering**, v. 22, n. 9, p. 1357–1370, 1998.

SUDDLE, S. The weighted risk analysis. **Safety Science**, v. 47, n. 5, p. 668–679, 2009.

SUL, G. DO E. DO R. G. DO. **Emergência da Fepam atende acidente ferroviário em Ijuí**. Disponível em: <<http://www.estado.rs.gov.br/conteudo/149696/emergencia-da-fepam-atende-acidente-ferroviario-em-ijui>>. Acesso em: 11 nov. 2016.

SUN, H. et al. Estimating the influence of common disruptions on urban rail transit networks. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 94, p. 62–75, 2016.

SVENSSON, G. A conceptual framework for the analysis of vulnerability in supply chains. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 30, n. 9, p. 731–750, nov. 2000.

TALARICO, L. et al. MISTRAL: A game-theoretical model to allocate security measures in a

multi-modal chemical transportation network with adaptive adversaries. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 138, p. 105–114, 2015.

TANG, C. S. Perspectives in supply chain risk management. **International Journal of Production Economics**, v. 103, n. 2, p. 451–488, 2006.

TANG, C.; TOMLIN, B. The power of flexibility for mitigating supply chain risks. **International Journal of Production Economics**, v. 116, n. 1, p. 12–27, 2008.

TANG, O.; NURMAYA MUSA, S. Identifying risk issues and research advancements in supply chain risk management. **International Journal of Production Economics**, v. 133, n. 1, p. 25–34, 2011.

TIXIER, J. et al. Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 15, n. 4, p. 291–303, 2002.

TORRETTA, V. et al. Decision support systems for assessing risks involved in transporting hazardous materials: A review. **Safety Science**, v. 92, p. 1–9, 2017.

VAN WEYENBERGE, B. et al. Development of a Risk Assessment Method for Life Safety in Case of Fire in Rail Tunnels. **Fire Technology**, p. 1465–1479, 2015.

VANORIO, G.; MERA, J. M. Methodology for risk analysis in railway tunnels using monte carlo simulation. **WIT Transactions on the Built Environment**, v. 127, p. 673–683, 2012b.

VERMA, M. A cost and expected consequence approach to planning and managing railroad transportation of hazardous materials. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 14, n. 5, p. 300–308, 2009a.

VERMA, M. A cost and expected consequence approach to planning and managing railroad transportation of hazardous materials. v. 14, n. 5, p. 300–308, jul. 2009b.

VERMA, M. Railroad transportation of dangerous goods: A conditional exposure approach to minimize transport risk. v. 19, n. 5, p. 790–802, ago. 2011.

VERMA, M.; VERTER, V. A lead-time based approach for planning rail-truck intermodal transportation of dangerous goods. **European Journal of Operational Research**, v. 202, p. 696–706, 2010a.

VERMA, M.; VERTER, V.; ZUFFEREY, N. A bi-objective model for planning and managing rail-truck intermodal transportation of hazardous materials. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 48, n. 1, p. 132–149, 2012.

VÍLCHEZ, J. A. et al. Historical analysis of accidents in chemical plants and in the transportation of hazardous materials. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 8, n. 2, p. 87–96, 1995.

VILKO, J. P. P.; HALLIKAS, J. M. Risk assessment in multimodal supply chains. **International Journal of Production Economics**, v. 140, n. 2, p. 586–595, 2012.

WOODRUFF, J. M. Consequence and likelihood in risk estimation: A matter of balance in UK health and safety risk assessment practice. **Safety Science**, v. 43, n. 5–6, p. 345–353,

2005.

YOON, H. et al. An environmental screening model to assess the consequences to soil and groundwater from railroad-tank-car spills of light non-aqueous phase liquids. **Journal of Hazardous Materials**, v. 165, n. 1–3, p. 332–344, 15 jun. 2009.

ZELENY, M. Multiple Criteria Decision Making (MCDM): From Paradigm Lost to Paradigm Regained? **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 18, n. 1–2, p. 77–89, jan. 2011.

ZHENG, W. et al. Estimation of Traffic Risk of Level Crossing Based on Stochastic Petri Nets Models and Social Economic Data. **2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2009**, v. 3, p. 518–521, 2009.

ZOGRAFOS, K. G.; VASILAKIS, G. M.; GIANNOULI, I. M. Methodological framework for developing decision support systems (DSS) for hazardous materials emergency response operations. **Journal of Hazardous Materials**, v. 71, n. 1–3, p. 503–521, jan. 2000.

ZSIDISIN, G. Managerial perceptions of supply risk. **Journal of Supply Chain Management**, v. 39, n. November, p. 14–26, 2003a.

ZSIDISIN, G. A. A grounded definition of supply risk. **Journal of Purchasing and Supply Management**, v. 9, n. 5–6, p. 217–224, 2003b.