



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TÉCNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

CLOVIS RODRIGUES CAVALCANTI FILHO

**FRAMEWORK PARA GESTÃO DE RISCOS EM ACIDENTES DE TRÂNSITO:
ESTUDO DE CASO EM UM TRECHO DA BR-232/PE**

Caruaru
2020

CLOVIS RODRIGUES CAVALCANTI FILHO

**FRAMEWORK PARA GESTÃO DE RISCOS EM ACIDENTES DE TRÂNSITO:
ESTUDO DE CASO EM UM TRECHO DA BR-232/PE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof^o. Dr. Thalles Vitelli Garcez.

Caruaru

2020

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier - CRB/4 - 1242

C376f Cavalcanti Filho, Clovis Rodrigues.
Framework para gestão de riscos em acidentes de trânsito: estudo de caso em um trecho da BR-232/PE. / Clovis Rodrigues Cavalcanti Filho. – 2020.
66 f. il. ; 30 cm.

Orientador: Thalles Vitelli Garcez.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia de Produção, 2020.
Inclui Referências.

1. Análise de riscos. 2. Acidentes de trânsito. 3. Rodovias. I. Garcez, Thalles Vitelli (Orientador). II. Título.

CDD 658.5 (23. ed.) UFPE (CAA 2020-094)

CLOVIS RODRIGUES CAVALCANTI FILHO

**FRAMEWORK PARA GESTÃO DE RISCOS EM ACIDENTES DE TRÂNSITO:
ESTUDO DE CASO EM UM TRECHO DA BR-232/PE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 10/11/2020.

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Thalles Vitelli Garcez (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Lucimário Gois de Oliveira Silva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. MSc. Cristina Pereira Medeiros (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e meu irmão por todo o apoio, compreensão, e incentivo durante minha trajetória acadêmica, além dos princípios e valores que foram fundamentais para a minha formação pessoal.

Agradeço ao meu orientador, Prof^o. Dr. Thalles Vitelli Garcez, por todas as oportunidades, ensinamentos e direcionamentos durante o desenvolvimento deste e outros trabalhos realizados durante a minha graduação.

Agradeço aos meus amigos pelo bom convívio durante esses anos de graduação e por estarem comigo nos bons e maus momentos.

RESUMO

Os acidentes rodoviários constituem um importante problema de saúde pública e desenvolvimento social, podendo resultar em mortes, ferimentos e várias consequências para as pessoas envolvidas. Há inúmeras ameaças e fatores de risco que podem desencadear na ocorrência de acidentes, variando de acordo com a rodovia, tipo de veículo, traçado da via, tipo de pista, etc. Entender os fatores críticos presentes nos acidentes pode contribuir de forma significativa para se intervir no fenômeno analisado, onde abordagens preventivas e mitigatórias podem ser utilizadas para amenizar os impactos causados pelos acidentes. Diante dessa problemática, este trabalho objetiva desenvolver um framework para elencar as principais etapas necessárias para se analisar e tratar os riscos de acidentes de trânsito em rodovias, através da utilização das ferramentas de gestão de risco, tais como, diagrama Bow-Tie, LOPA e Matriz de Risco. Para tanto, um estudo de caso foi desenvolvido para validar o framework e avaliar os riscos presentes nos acidentes de trânsito registrados em um trecho crítico da BR-232/PE, rodovia esta que apresenta grande quantidade de acidentes e o maior número de óbitos dentre as rodovias do estado. Como resultado obtido, gerou-se um esquema visual das principais ameaças, consequências e medidas de segurança utilizadas para conter o risco de acidentes de trânsito, onde todas as causas e consequências do evento principal foram conhecidas, e as medidas de segurança a serem adotadas e controladas puderam ser identificadas para manter os níveis de risco em padrões toleráveis. Portanto, os resultados obtidos com a utilização do framework podem contribuir para eventuais decisões que busquem reduzir os riscos de acidentes.

Palavras-chave: Framework. Análise de risco. Diagrama Bow-Tie. LOPA. Matriz de risco. Acidentes de trânsito. Rodovias

ABSTRACT

Road accidents are an important public health and social development problem, which can result in deaths, injuries, and various consequences for the people involved. There are numerous threats and risk factors that can trigger accidents, varying according to the road, type of vehicle, the layout of the road, type of lane, etc. Understanding these critical factors present in accidents can contribute significantly to intervene in the analyzed phenomenon, where preventive and mitigating approaches can be used to mitigate the impacts caused by accidents. In view of this problem, the objective of this work was to develop a framework to list the main steps required to analyze and treat road traffic accidents risk, using the risk management tools, such as the Bow-Tie diagram, the LOPA, and the Risk matrix. To this end, a case study was developed to validate the framework and assess the risks present in traffic accidents registered in a critical section of BR-232/PE road. As a result, a visual scheme of the main threats, consequences, and safety measures used to contain the risk of traffic accidents was generated, where all the causes and consequences of the main event were known/considered, and the safety measures to be adopted and controlled could be identified to maintain risk levels within tolerable standards. Therefore, the results obtained with the use of the framework can contribute to eventual decisions that seek to reduce the risk of traffic accidents.

Keywords: Framework. Risk analysis. Bow-Tie diagram. LOPA. Matrix risk. Traffic-accidents. Roads.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das etapas do estudo	18
Figura 2 - Estrutura diagrama Bow-Tie.....	22
Figura 3 - Estrutura da Matriz de Risco	26
Figura 4 - Framework para Gestão de Risco	33
Figura 5 - Ocorrências de acidentes por ano.....	36
Figura 6 - Óbitos por ano.....	35
Figura 7 - Evento principal.....	44
Figura 8 - Ameaças do diagrama Bow-Tie.....	47
Figura 9 - Consequências do diagrama Bow-Tie	47
Figura 10 - Matriz de risco global para as consequências.....	49
Figura 11 - Resultados da análise LOPA para o nível de risco	55
Figura 12 - Resultado da análise LOPA para o nível de risco após adição de barreiras de proteção	56
Figura 13 - Estrutura diagrama Bow-Tie.....	57
Figura 14 - Nova matriz de risco para a consequência 1	57
Figura 15 - Nova matriz de risco para a consequência 2.....	58
Figura 16 - Nova matriz de risco para a consequência 4.....	58
Figura 17 - Ameaças do diagrama Bow-Tie.....	65
Figura 18 - Evento principal e consequências do diagrama Bow-Tie.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Acidentes por BR	36
Tabela 2 - Ocorrências (Estado físico / BR).....	37
Tabela 3 - Ocorrências entre tipos de veículos.....	37
Tabela 4 - Ocorrências entre tipos de pistas.....	38
Tabela 5 - Ocorrências nos traçados de via	38
Tabela 6 - Principais causas de acidentes.....	40
Tabela 7 - Principais tipos de acidentes.....	40
Tabela 8 - Causas de acidentes (2017)	41
Tabela 9 - Tipos de acidentes (2017)	41
Tabela 10 - Tipos mais frequentes entre as causas (2017)	41
Tabela 11 - Causas de acidentes (2018)	42
Tabela 12 - Tipos de acidentes (2018).....	42
Tabela 13 - Tipos mais frequentes entre as causas (2018)	42
Tabela 14 - Causas de acidentes (2019)	42
Tabela 15 - Tipos de acidentes (2019).....	42
Tabela 16 - Tipos mais frequentes entre as causas (2019)	42
Tabela 17 - Causas e tipos mais frequentes nos acidentes	44
Tabela 18 - Barreiras preventivas para cada ameaça do modelo.....	46
Tabela 19 - Barreiras mitigativas para as consequências do modelo	46
Tabela 20 - Critérios para a probabilidade do risco.....	48
Tabela 21 - Critérios para o impacto do risco	48
Tabela 22 – Consequências do modelo	49
Tabela 23 - Descrição das PFD's a serem utilizadas	52
Tabela 24 - Frequências de ocorrência para o evento principal	53
Tabela 25 - Frequências de ocorrência das ameaças	53
Tabela 26 - Probabilidade das consequências	53
Tabela 27 - PFD das barreiras preventivas.....	54
Tabela 28 - PFD das barreiras mitigativas.....	54

LISTA DE SIGLAS

CNT	CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES
PIB	PRODUTO INTERNO BRUTO
PRF	POLÍCIA RODOVIÁRIA FEDERAL
LOPA	LAYERS OF PROTECTION ANALYSIS
IPEA	INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA
DETRAN	DEPARTAMENTO DE TRÂNSITO
VMD	VOLUME MÉDIO DIÁRIO
DNIT	DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES
PFD	PROBABILIDADE DE FALHA SOB DEMANDA
ROPS	ROLL OVER PROTECTION SYSTEM
OMS	ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	15
1.2	Justificativa	16
1.3	Estrutura do Trabalho	17
2	METODOLOGIA	18
3	REFERENCIAL TEÓRICO	20
3.1	Análise Bow-Tie	20
3.1.1	Contexto histórico	20
3.1.2	Descrição do diagrama Bow-Tie	21
3.1.3	Elementos do diagrama Bow-Tie	22
3.1.4	Barreiras de segurança	23
3.1.5	Particularidades do diagrama Bow-Tie	24
3.1.6	Aplicação da metodologia Bow-Tie	24
3.2	Matriz de Risco	26
3.3	LOPA	27
3.4	Análise descritiva	30
4	FRAMEWORK PARA GESTÃO DE RISCO	32
4.1	Estudo de caso	34
4.1.1	Contexto geral dos acidentes de trânsito	34
4.1.2	Identificação das fontes de risco	35
4.1.3	Análise das causas e tipos de acidentes	39
4.2	Análise de riscos	43
4.2.1	Implementação do diagrama Bow-Tie	43
4.3	Avaliação de risco	48
4.3.1	Matriz de Risco	48
4.3.2	Análise LOPA	50
5	CONCLUSÕES	60

REFERÊNCIAS	62
APÊNDICE A – ESTRUTURA DESAGREGADA DO DIAGRAMA BOW-TIE	65

1. INTRODUÇÃO

O número de veículos automotores aumentou de forma considerável ao longo dos últimos anos, causando um aumento na densidade de tráfego nas estradas ao redor do mundo. A principal consequência dessa situação é refletida no aumento dos acidentes registrados, tornando-se um problema crítico para muitos países, que afeta diretamente na saúde e bem-estar dos seus cidadãos, onde a taxa de mortalidade por acidentes chega a ser três vezes maior em países de baixa renda do que em países de alta renda (WHO, 2018). O ônus das causalidades de acidentes rodoviários e os danos que os mesmos causam na sociedade trazem grandes prejuízos para países desenvolvidos e, principalmente, àqueles em desenvolvimento (DEB; LIEW, 2016).

Os acidentes de trânsito e a segurança nas estradas são temas de frequente discussão no âmbito global, onde sempre busca-se minimizar as consequências e impactos que os acidentes podem causar para a sociedade. Na análise dos acidentes rodoviários destacam-se como um dos principais aspectos explorados, onde os mesmos representam um problema econômico para diversos países, devido às despesas tomadas para indenizar as partes envolvidas nos incidentes (EBOLI; MAZZULLA, 2008).

Em vista disso, houve uma crescente preocupação relacionada aos acidentes de trânsito nos últimos anos. Os acidentes podem causar desde danos leves as pessoas até ferimentos graves e mortes. Assim, a acidentalidade nas rodovias é uma das principais causas de morte humana em todo o mundo, sendo a oitava principal causa para todas as idades. Esses dados ficam mais críticos quando se analisa a faixa etária de 5-29 anos, onde os acidentes de trânsito representam a principal causa de morte desse grupo (WHO, 2018). Apesar do tema segurança rodoviária estar em crescente sensibilização em todo o mundo, a frequência de acidentes rodoviários ainda está em ascensão, o que mostra a necessidade de medidas preventivas e mitigatórias para reverter esse cenário (OWUSU *et al.*, 2018; WHO, 2018). Além disso, Bioulac *et al.* (2017) ratifica que os acidentes com veículos automotores representam uma das principais causas de mortalidade e morbidade em todo o mundo, devendo ser a quarta principal causa de morte em 2030.

De acordo com os dados da OMS (Organização Mundial da Saúde) (WHO, 2018), acidentes de trânsito resultam em fatalidades de mais de 1,35 milhão de vidas a cada ano e causam até 50 milhões de feridos. Aproximadamente 3.700 pessoas morrem todos os dias nas rodovias mundiais. Além disso, esses acidentes custam à maioria dos países cerca de 3% do seu produto interno bruto (PIB). Pode-se destacar diversas razões para o grande número de ocorrências de acidentes, tais como: urbanização rápida, padrões de segurança insatisfatórios,

falta de fiscalização, pessoas dirigindo sob a influência de drogas ou álcool, excesso de velocidade e falta de cinto de segurança ou capacete (WHO, 2018).

Devido a vários fatores como comportamento impróprio ao dirigir, defeito mecânico do veículo, e assim por diante, os acidentes rodoviários tornam-se um tanto inevitáveis. Alguns desses fatores podem desencadear na ocorrência de acidentes de trânsito e impactar de forma direta na gravidade dos mesmos, como os elementos geométricos da estrada, as condições climáticas, o perfil comportamental dos motoristas, o uso de substâncias psicoativas, fadiga do motorista, distração devido ao uso de aparelhos eletrônicos durante a condução. Dessa forma, implementar estratégias preventivas adequadas pode ser eficaz para redução dos casos de acidentes registrados (KASSU; ANDERSON, 2019).

Em 2018 foi publicado pelo *WRI Ross Center for Sustainable Cities* e pelo Banco Mundial o Relatório Sustentável e Seguro (WELLE *et al.*, 2018), que fornece orientações sobre como criar um sistema de mobilidade seguro para todos as pessoas, com o objetivo de mitigar riscos de acidentes de trânsito e oferecer uma grande variedade de opções seguras e saudáveis de mobilidade. Algumas ações e princípios que podem ajudar na redução da acidentalidade nas rodovias incorporam desde o estabelecimento de metas sólidas e verificáveis sobre os acidentes nas rodovias, o aprimoramento de análises econômicas para garantir melhores investimentos em recursos, a identificação de áreas críticas para maximizar as intervenções executadas, realização de fiscalizações e aplicação de leis e regulamentações, gestão de velocidade abrangente para estabelecer velocidades seguras, além de garantir melhor qualidade de resposta no atendimento das emergências, para assim diminuir a taxa de mortalidade na ocorrência das mesmas.

Os dados divulgados pela OMS (WHO, 2018) mostram que o trânsito brasileiro é o quarto mais violento do continente americano, sendo responsável por diversos óbitos todos os anos. O estudo realizado por (MELLO JORGE; LATORRE, 1994) mostrou que no Brasil, os acidentes e violências podem ser as principais causas de morte para algumas idades, onde os acidentes de trânsito correspondem a uma importante parcela. A ocorrência dessas mortes nos estados e cidades brasileiras apresentam padrões distintos, sendo necessário uma análise diferente para cada localidade e suas particularidades.

O modal rodoviário no Brasil é o principal sistema logístico do país, por onde passam cerca de 60% de todas as cargas movimentadas no território brasileiro (APÓLICE, 2013). Dessa forma, a importância desse modal de transporte torna necessária a execução de ações de segurança para redução dos acidentes de trânsito nas rodovias mais críticas do Brasil.

A CNT (Confederação Nacional de Transportes) realizou um estudo denominado Transporte Rodoviário – Desempenho do Setor, Infraestrutura e Investimentos (CNT, 2017), onde foi possível verificar que 57,3% das rodovias avaliadas não apresentavam condições adequadas para o tráfego de veículos. Além disso, cerca de 31 mil quilômetros de rodovias continham problemas na sinalização, pavimento e na geometria. Esses fatos revelam problemas para a segurança do tráfego rodoviário, podendo aumentar o custo operacional do transporte e causar impactos negativos a sociedade.

O Brasil possui uma frota de aproximadamente 104,06 milhões de veículos, sendo principalmente composta por automóveis (54,10%), motocicletas (22,12%) e caminhonetes (7,57%). Dessa frota de veículos 3,10 milhões estão presentes no estado de Pernambuco (DENATRAN, 2019).

Segundo dados levantados pela PRF (Polícia Rodoviária Federal), no ano de 2019 houveram 308 mortes nas rodovias federais que cortam Pernambuco. O número foi maior do que em 2018, quando 296 óbitos foram registrados. O total de acidentes contabilizados em 2019 foi de 2.736, cerca de 1,01% maior do que o registrado no ano de 2018, quando ocorreram 2.714 colisões. Desse modo, é notável que a ocorrência de acidentes nas rodovias federais pernambucanas cresceu nos últimos anos, mostrando a necessidade de um estudo mais detalhado para verificar e tratar as principais causas e consequências que os acidentes podem provocar aos envolvidos, visando desse modo reduzir os acidentes registrados (PRF, 2019).

Na maioria dos casos os acidentes envolvem erros humanos, onde para entender as causas mais profundas envolvidas nos incidentes a análise do comportamento das variáveis presentes no evento indesejado é de grande relevância. Para analisar o risco de acidentes e melhorar a segurança, os fatores presentes nas atividades de risco precisam ser entendidos e incluídos em modelos de gerenciamento de risco, onde os possíveis acidentes e suas causas subjacentes devem ser avaliadas para buscar diminuir as taxas de risco envolvidas no processo. Para melhorar os cenários de risco indesejáveis, a implementação de ações e mudanças em processos críticos podem resultar em melhores resultados para uma determinada atividade que envolve riscos (XIN; HUANG, 2013).

Segundo a ISO 31000 (2018), o gerenciamento de riscos inclui as atividades desenvolvidas para avaliar e controlar os riscos de uma determinada situação. A análise de risco envolve o desenvolvimento da compreensão do risco, observando as causas e fontes do evento indesejado, seus pontos positivos, negativos e possíveis consequências. É importante o uso de todas as informações disponíveis para se estimar o risco de um acidente, avaliando os perigos identificados e comparando-os com os alvos, em busca de soluções otimizadas para prevenir e

mitigar as consequências que um evento de risco pode causar. O resultado final de uma análise de risco pode ser expresso em termos qualitativos, quantitativos ou mistos, dependendo da situação de risco analisada, do nível de detalhamento requerido e das informações disponíveis (XIN; HUANG, 2013).

O risco pode ser considerado como a frequência ou probabilidade de ocorrência de um determinado evento perigoso, podendo afetar de maneira adversa alguém ou algo que é avaliado, gerando possíveis consequências indesejadas de acordo com cada situação. A análise de risco é um elemento importante para avaliar o impacto e as consequências para atividades humanas em eventos que envolvem condições inseguras. A diversidade de cenários possíveis para se realizar uma análise de risco é acobertada por algumas técnicas apropriadas que se encaixam em diversas situações de risco (MARHAVILAS; KOULOURIOTIS; GEMENI, 2011).

Visto a importância de avaliar os riscos de acidentes, o presente estudo propõe um framework para analisar e tratar os riscos presentes no cenário de acidentes de trânsito, aplicando ferramentas e técnicas de gestão de risco no contexto considerado. Para tanto, utilizar-se-á o diagrama Bow-Tie, matrizes de risco e a metodologia LOPA (*Layers of Protection Analysis*) para avaliar os diferentes perigos e consequências envolvidas nesse cenário.

Diante dessa problemática, é essencial que o framework aborde os principais meios para elucidar os fatores que possam acarretar na ocorrência dos acidentes de trânsito, dado que existem várias causas de acidentes e nem sempre as medidas preventivas adotadas são eficazes na redução dos casos registrados. Além disso, as consequências dos acidentes devem ser esclarecidas, para que desse modo os índices de mortalidade e casos críticos no trânsito diminuam progressivamente com as medidas mitigativas adotadas.

1.1. Objetivos

O principal objetivo desse trabalho é desenvolver um framework para analisar e tratar os fatores de risco presentes nos acidentes de trânsito, aplicando a ferramenta de gerenciamento de risco Bow-Tie em conjunto com a metodologia LOPA e matrizes de risco.

Para atender a este objetivo geral, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Analisar de forma descritiva os acidentes de trânsito registrados nos últimos anos nas rodovias federais de Pernambuco;
- Analisar o uso das ferramentas de gerenciamento de risco na literatura;

- Propor um framework para gestão de risco em cenários de acidentes de trânsito, utilizando as ferramentas de gerenciamento de risco abordadas neste trabalho;
- Aplicar o framework no cenário de acidentes de trânsito, definindo os parâmetros que serão considerados.

1.2. Justificativa

Os acidentes de trânsito são um dos principais responsáveis pelos casos de mortes e feridos ao redor do mundo, representando um problema de Saúde Pública não só no Brasil, mas também em diversos países. Logo, a gestão eficiente desses acidentes pode trazer benefícios relevantes para a saúde e bem-estar da população. Os altos índices de mortalidade no trânsito podem ser explicados pelo desdobramento de alguns fatores críticos que podem agravar cada vez mais essa situação. Dentre eles, pode-se citar a urbanização acelerada, que resultou em uma infraestrutura insuficiente para sua demanda populacional, além de uma legislação frágil e uma estrutura de fiscalização deficiente. Desse modo, medidas regulatórias podem ser efetivas no enfrentamento das mortes e ferimentos no trânsito (MORAIS NETO *et al.*, 2013).

No ano de 2019, cerca de 2736 acidentes de trânsito ocorreram nas rodovias federais do estado de Pernambuco, envolvendo cerca de 6405 pessoas dentre os quais 32,12% resultaram em consequências com ferimentos leves, 12,38% resultaram em feridos graves e 4,81% resultaram em vítimas fatais, contabilizando 308 óbitos. Além disso, em 2014, um estudo realizado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) mostrou que os custos com acidentes de trânsito nas rodovias federais foram de aproximadamente R\$ 7.950.904.442 (IPEA, 2015).

Existem vários fatores que determinam a ocorrência de um acidente. A ocorrência de um acidente não está ligada somente a um destes fatores, mas a vários deles, que podem estar relacionados às estradas, ao motorista, as condições climáticas e aos veículos. Esses fatores podem aumentar o risco de acidentes de trânsito, entre eles tem-se: condições meteorológicas desfavoráveis, defeitos na via, defeito mecânico no veículo, animais na pista, falta de atenção, entre outros (CHAGAS; NODARI; LINDAU, 2011). Desse modo, o conhecimento e a análise dos panoramas dos acidentes no decorrer dos anos podem auxiliar no planejamento e priorização de programas de prevenção que minimizam os riscos de acidentes.

Para haver uma redução dos acidentes e mortes nas estradas, é importante compreender de forma extensiva os riscos envolvidos (PAPADIMITRIOU *et al.*, 2019), visando dessa forma pôr em prática medidas preventivas e mitigatórias que venham melhorar o quadro de acidentalidade nas rodovias. Dessa forma, justifica-se o desenvolvimento de um framework

para gerenciamento de riscos pelo fato do mesmo ser de simples compreensão e eficiente no seu propósito, direcionando a análise e tratamento dos riscos que cercam os acidentes de trânsito, traduzindo-se em uma alternativa visual para a gestão dos riscos.

1.3. Estrutura do Trabalho

Após as abordagens discutidas no Capítulo 1, o restante desse trabalho pode ser organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 descreve a metodologia seguida durante o trabalho, sendo determinada a sequência lógica para atingir-se os objetivos relatados. Uma breve revisão da literatura é apresentada no Capítulo 3, onde há um embasamento conceitual referente as ferramentas de risco utilizadas nesse estudo. O Capítulo 4 expõe os resultados obtidos deste estudo, onde o framework e o estudo de caso desenvolvido são apresentados. Por fim, o Capítulo 5 descreve as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

2. METODOLOGIA

De acordo com os objetivos e características da pesquisa, explorados no decorrer desse estudo, é viável tratá-la como de caráter exploratória e descritiva. O caráter exploratório deve-se ao levantamento de informações sobre a acidentalidade nas rodovias federais de Pernambuco, de modo a entender melhor esse fenômeno com vista a formular problemas e hipóteses mais precisas. Já o caráter descritivo existe, pois, procura-se descrever as etapas necessárias para se avaliar os riscos de acidentes, através de um framework, para assim visualizar e tratar os principais fatores críticos que estão presentes nos acidentes de trânsito.

Com base no modelo conceitual da pesquisa e buscando a metodologia que melhor se encaixasse na realidade do problema, utilizou-se um estudo de caso como método de pesquisa, visto que se trata de um estudo sobre um fenômeno contemporâneo, partindo do seu contexto real e utilizando múltiplas fontes de evidências para auxiliar no desenvolvimento da análise de risco proposta. A descrição do estudo de caso e as demais etapas a serem abordadas serão sintetizadas logo a seguir.

Os procedimentos necessários para o desenvolvimento do presente trabalho estão dispostos no fluxograma da Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma das etapas do estudo



Fonte: Autor (2020)

A princípio, foram realizadas pesquisas bibliográficas com vista a abordar as principais informações existentes na literatura sobre acidentes de trânsito e as metodologias de gerenciamento de risco. A exploração do tema foi desenvolvida através da leitura de artigos no portal de Periódicos Capes, com o objetivo de construir um embasamento conceitual referente as ferramentas a serem utilizadas nesse estudo e reunir informações acerca da acidentalidade de trânsito nas rodovias mundiais e nacionais, observando ações de redução de riscos de acidentes e verificando as possíveis causas e consequências registradas durante os últimos anos. Além disso, foram feitas pesquisas e análises nos bancos de dados de acidentes, disponibilizados pelo Departamento de Polícia Rodoviária Federal, para coletar informações sobre a acidentalidade nas principais rodovias federais pernambucanas, com vista a entender os principais fatores que estão envolvidos nos casos registrados.

Frameworks são utilizados em várias áreas de pesquisa, sendo flexível para atender diferentes configurações. Um framework consiste em uma estrutura visual que aborda informações qualitativas sobre uma determinada problemática. Dessa forma, a descrição e interpretação da sequência de etapas que configuram um evento são as principais contribuições que um framework pode fornecer (SRIVASTAVA; THOMSON, 2009). Diante disso, esse trabalho propõe um framework para identificar e avaliar as principais etapas presentes em uma análise de risco, considerando a aplicação do diagrama Bow-Tie, Matriz de Risco e análise LOPA para tratamento dos riscos existentes na temática abordada.

Para validação do framework desenvolvido, um estudo de caso foi aplicado para analisar os fatores de risco presentes nos acidentes de trânsito registrados em um trecho crítico da malha rodoviária pernambucana. Para tanto, os cenários de acidentes foram explorados por meio da metodologia Bow-Tie e análise LOPA, sendo possível verificar as principais causas e consequências que os acidentes trazem para os indivíduos, além de apurar a eficácia das medidas de segurança proativas e reativas utilizadas para evitar e reduzir os danos causados pelos acidentes de trânsito.

Por fim, verificou-se a eficiência dos resultados obtidos, para assim analisar se as medidas preventivas e mitigatórias definidas são toleráveis para retardar a ocorrência de acidentes, gerando um maior controle dos principais fatores de risco presentes no cenário estabelecido.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo contará com as bases teóricas referentes a temática abordada neste estudo. O tópico 3.1 discute os conceitos e as principais informações sobre a análise Bow-Tie. O tópico 3.2 aponta as diretrizes e características das matrizes de risco. Em seguida, o tópico 3.3 aborda as particularidades e o modo de aplicação da análise LOPA. Por fim, o tópico 3.4 comenta as bases que cercam a análise descritiva.

3.1. Análise Bow-Tie

3.1.1. Contexto histórico

A origem do método Bow-Tie não é conhecida de forma concreta. Acredita-se que a ferramenta costumava ser chamada originalmente de diagrama borboleta, sendo criado em meados da década de 1970 com base nos diagramas de causa-efeito. Vincula-se a David Gill, da *Imperial Chemical Industries*, a responsabilidade pelo desenvolvimento da técnica. No início dos anos 90 houve uma popularização da metodologia devido ao incidente catastrófico na plataforma petrolífera Piper Alpha, que causou a morte de 167 pessoas no Mar do Norte (YAZDI, 2017).

O conceito do diagrama Bow-Tie ganhou popularidade nos últimos anos, sendo capaz de oferecer uma boa visualização dos diferentes cenários de acidentes. De fato, o Bow-Tie quando bem utilizado permite identificar todas as causas e consequências de um acidente, além de representar o desempenho e influência dos sistemas de segurança na evolução dos cenários de acidentes (DEDIANOUS *et al.*, 2006).

Na literatura, tem-se alguns trabalhos que envolvem a aplicação do diagrama Bow-Tie para análise de riscos em diferentes meios de transporte. Ehlers *et al.* (2017) buscou realizar uma análise Bow-Tie como uma estrutura conceitual para avaliar o efeito de segurança de sistemas de transporte inteligentes cooperativos, aplicando essa abordagem de análise na segurança do tráfego rodoviário. Em Wisniowski e Lukasik (2016), foi realizada uma abordagem de avaliação de risco adequada ao setor marítimo de transporte, onde foram dispostos exemplos envolvendo a metodologia Bow-Tie para diferentes cenários do transporte marítimo. Aust e Pons (2019) propuseram uma análise Bow-Tie para identificar os riscos inerentes durante as tarefas de manutenção do motor de aeronaves e suas principais implicações na segurança e qualidade das operações de voo.

3.1.2. Descrição do diagrama Bow-Tie

O diagrama Bow-Tie é popular na análise de riscos relacionados à segurança, podendo ser utilizado quando os dados disponíveis para quantificação dos riscos são escassos ou de difícil acesso. Dessa maneira, o método Bow-Tie é flexível para avaliar diferentes tipos de risco, incluindo ambiental, químico, biológico, segurança, entre outros. Logo, o método costuma ser utilizado em diferentes situações que envolvem riscos (YAZDI, 2017).

Através do diagrama Bow-Tie, é possível obter uma visão geral dos prováveis cenários de acidentes, permitindo verificar as principais causas e consequências que estão relacionadas ao evento crítico, sendo uma das principais ferramentas para execução de análises de risco. Em um cenário de acidente, o vínculo entre um acidente e todas as suas potenciais causas podem ser sintetizadas por meio de uma árvore de falhas. Por outro lado, as possíveis consequências desse acidente podem ser relacionadas através de uma árvore de eventos. Um diagrama Bow-Tie permite integrar árvores de falhas e eventos em uma única estrutura, onde o evento central que os une representa a ocorrência de um evento de risco (MOKHTARI *et al.*, 2011).

O diagrama Bow-Tie não provou apenas ser uma metodologia eficaz na previsão de acidentes, mas também demonstrou sua importância na análise destes, trazendo melhorias consideráveis para evitar novas ocorrências de eventos indesejados. Além disso, merece destaque a simplificação de informações que o método Bow-Tie pode proporcionar, onde os diferentes fatores causais e as consequências dos acidentes podem ser resumidas em um número relativamente pequeno de cenários comuns, que devem cobrir a maioria dos acidentes. Essa estrutura torna-se útil para analisar e descrever os diferentes parâmetros envolvidos nos acidentes, visto que suas causas e consequências permanecem interligadas (MOKHTARI *et al.*, 2011).

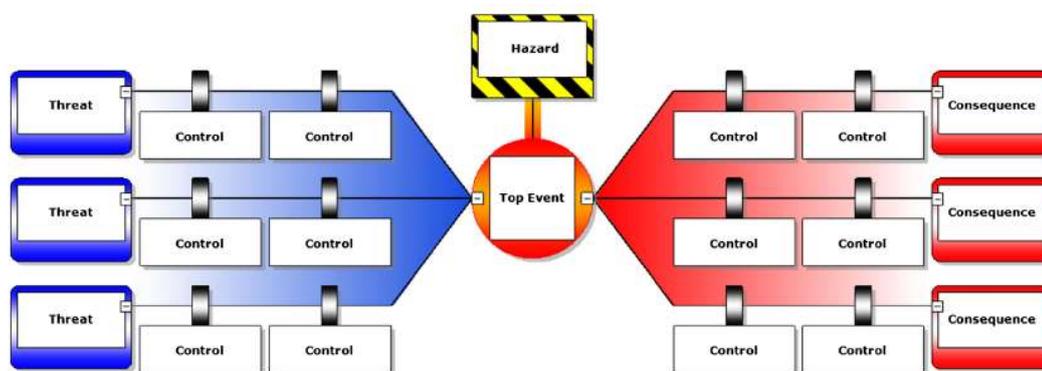
Diante disso, a análise Bow-Tie consiste em uma técnica que busca analisar os riscos de acidentes em termos de avaliação das probabilidades e possíveis caminhos de ocorrências, onde as causas que levam ao evento crítico devem ser controladas por meio de ações preventivas e as consequências desse evento devem ser mitigadas o máximo possível. Logo, a relação entre causas e consequências são identificadas de maneira clara em um diagrama Bow-Tie (DUIJM, 2009; SHAHRIAR; SADIQ; TEFAMARIAM, 2012).

A estrutura do diagrama Bow-Tie é centrada em um evento crítico, sendo composta por uma árvore de falhas no lado esquerdo, onde as possíveis ameaças que causam a ocorrência do evento de risco são determinadas, e uma árvore de eventos no lado direito, que corresponde as possíveis consequências que são desencadeadas a partir da ocorrência do evento crítico. Dessa forma, do lado esquerdo do diagrama estão os eventos básicos que podem resultar no evento

principal e do lado direito estão as consequências causadas por esse evento. Para evitar o evento principal, barreiras de segurança devem ser adotadas. Medidas preventivas de segurança são configuradas no lado esquerdo do evento crítico e medidas de segurança mitigatórias são definidas no lado direito (DELVOSALLE *et al.*, 2006). Depois que o diagrama é construído, análises quantitativas podem ser realizadas para verificar se as barreiras preventivas e mitigatórias são eficazes na prevenção e amenização das consequências do evento de risco (SHAHRIAR; SADIQ; TEFAMARIAM, 2012).

De acordo com as descrições citadas, a estrutura básica de um diagrama Bow-Tie pode ser vista na Figura 2.

Figura 2 - Estrutura diagrama Bow-Tie



Fonte: MULCAHY *et al.*, (2017)

O diagrama Bow-Tie permite a realização de análises qualitativas e quantitativas. Analisando a perspectiva qualitativa, o diagrama Bow-Tie descreve o relacionamento entre as variáveis de um cenário de acidente, auxiliando a entender quais as potenciais causas que levariam ao evento principal e quais barreiras de segurança são eficazes para prevenir a ocorrência do mesmo. A análise quantitativa pode ser realizada atribuindo probabilidades de frequência aos componentes causais do evento de risco e as barreiras de segurança propostas no modelo (KHAKZAD; KHAN; AMYOTTE, 2012).

3.1.3. Elementos do diagrama Bow-Tie

Um diagrama Bow-Tie compreende alguns elementos básicos, que são (DE RUIJTER; GULDENMUND, 2015; FERDOUS *et al.*, 2013; MULCAHY *et al.*, 2017):

- **Evento principal:** fica disposto no centro do diagrama Bow-Tie e representa algo ou situação que tem potencial para causar danos e perdas se não for adequadamente controlado. O evento principal constitui o momento em que o estado controlado de um perigo é perdido.

- **Ameaças:** as ameaças (causas) compreendem as razões fundamentais que resultam em falhas, mau funcionamento de um componente ou erro humano. Esses eventos podem iniciar a cadeia de ações que levará a ocorrência do evento principal.
- **Consequências:** representa as consequências finais resultantes da ocorrência do evento crítico, onde seus resultados podem ser agravados ou amenizados de acordo com a eficiência das barreiras de mitigação presentes no modelo.
- **Barreiras de segurança:** barreiras de proteção são as medidas que tentam impedir e mitigar os resultados indesejados, reduzindo sua probabilidade de ocorrência com vista a manter um nível de risco aceitável.

3.1.4. Barreiras de segurança

As barreiras de proteção do diagrama Bow-Tie são de fundamental importância para se alcançar condições seguras em diferentes processos que envolvem risco. A segurança obtida pelas camadas de proteção é resultado da eficiência das mesmas em neutralizar as ameaças consideradas no cenário de risco, impedindo dessa forma a ocorrências do evento crítico (PASMAN; ROGERS, 2013).

As barreiras de segurança propostas em um diagrama Bow-Tie podem ser baseadas em sistemas físicos, ações humanas, procedimentos operacionais, controles administrativos, entre outros. Essas barreiras têm como principal diretriz incrementar à função de segurança em um evento de risco. Sendo assim, uma barreira de segurança pode ser representada por ações de um operador, sistemas de segurança, sinalizações de advertência, campanhas de conscientização. Em alguns casos mais de um tipo de barreiras de segurança são utilizadas para manter a eficácia da função segurança (DEDIANOUS *et al.*, 2006).

Segundo Dedianous *et al.* (2006), pode-se definir quatro tipos de barreiras de segurança. As barreiras passivas estão sempre em funcionamento, sem necessidade de intervenções humanas, fontes de energia ou fontes de informação. Já as barreiras ativadas são aquelas que exigem uma sequência de detecção, diagnóstico e ação para entrar em funcionamento, necessitando que condições prévias sejam atendidas para que de fato a barreira possa entrar em ação. As barreiras simbólicas requerem uma interpretação humana para atingir seus objetivos, como exemplos desse tipo de barreira tem-se as placas de advertência, avisos passivos, entre outros. Por fim, as ações humanas constituem o último tipo de barreira, sua efetividade é baseada no conhecimento do operador para atingir o objetivo. Essas ações podem fazer parte da sequência de detecção, diagnóstico e ação.

3.1.5. Particularidades do diagrama Bow-Tie

Ao longo dos últimos anos, a metodologia Bow-Tie vem se destacando como uma ferramenta eficaz para o gerenciamento de riscos e fatores de segurança, sendo amplamente utilizada devido a algumas vantagens, dentre elas pode-se citar (FERDOUS *et al.*, 2013):

- Fornece uma representação gráfica para os diferentes cenários de acidentes;
- Fornece ligações explícitas entre as causas e os seus resultados potenciais;
- Conecta possíveis consequências ao evento indesejado e suas causas;
- Fornece orientação, declarando desde as causas básicas até as consequências finais;
- Fornece ajuda sistemática na análise de riscos abrangentes e avaliação de medidas de segurança.

Algumas particularidades envolvidas no desenvolvimento de um diagrama Bow-Tie pode ser destacadas (DEDIANOUS *et al.*, 2006; DUIJM, 2009):

- O evento principal faz a ligação entre o lado das ameaças e o lado das consequências em um diagrama Bow-Tie;
- As causas responsáveis pela ocorrência do evento crítico são representadas no lado esquerdo do diagrama;
- As consequências resultantes do evento de risco são representadas no lado direito do diagrama;
- As barreiras preventivas devem ser alocadas no lado esquerdo do diagrama, entre as causas e o evento principal;
- As barreiras mitigativas devem ser alocadas no lado direito do diagrama, entre as consequências e o evento principal;

3.1.6. Aplicação da metodologia Bow-Tie

Alguns passos podem ser seguidos para aplicação do método de análise Bow-Tie (ESTRAT, 2020; MULCAHY *et al.*, 2017):

1. A princípio, deve-se identificar o risco e o evento principal que será analisado e representado como o nó central do diagrama Bow-Tie. Através da aplicação de ferramentas e técnicas de identificação de riscos, as fontes de risco são identificadas, bem como as áreas de impacto, os eventos, causas e suas possíveis consequências. Além disso, o evento principal é definido, representando o

momento em que o estado controlado de um perigo é perdido, e essa perda pode resultar em formas específicas de dano.

2. Após a identificação do risco e do evento principal, são listadas as causas que podem potencialmente resultar, através de vários caminhos, na ocorrência do evento principal se todas as barreiras de segurança falharem. Para isso, ordena-se no lado esquerdo do diagrama todas as possíveis ameaças que levariam à concretização do risco.
3. A terceira etapa consiste em listar as barreiras de controle. As barreiras são elementos fundamentais na metodologia Bow-Tie, uma vez que é por meio delas que se pode evitar que cada causa leve a consequências indesejadas, neutralizando dessa forma as ameaças consideradas no modelo. É importante listar as barreiras para cada uma das causas do evento crítico em questão. Dessa forma, após todos esses elementos serem definidos, o lado esquerdo do diagrama Bow-Tie estará concluído.
4. Caso o evento crítico aconteça, é preciso estar ciente das possíveis consequências que podem ocorrer. Essa é a quarta etapa para implementação do diagrama, e representa o lado direito do Bow-Tie, onde deve-se listar todos os possíveis desdobramentos da liberação do evento principal.
5. Como nem sempre é possível eliminar o risco de maneira definitiva, a quinta etapa consiste em identificar as barreiras mitigativas do modelo que irão tentar impedir a irradiação das consequências. Essas barreiras são utilizadas para neutralizar as consequências de determinado evento de risco. Sendo assim, é importante elencar para cada uma das consequências identificadas as barreiras de segurança que podem ser utilizadas para neutralizar ou eliminar os efeitos indesejados dessas consequências. Com a finalização dessa etapa, o lado direito do diagrama estará concluído.

Após o diagrama Bow-Tie ser construído, é possível visualizar todos os elementos que cercam o evento de risco, verificando as ameaças que podem acarretar na ocorrência do evento topo e nas suas principais consequências, bem como as barreiras de proteção que podem impedir ou mitigar os resultados do evento em análise. Dessa forma, um melhor entendimento e gerenciamento direcionado desses riscos tem o potencial de aprimorar os níveis de segurança do sistema considerado.

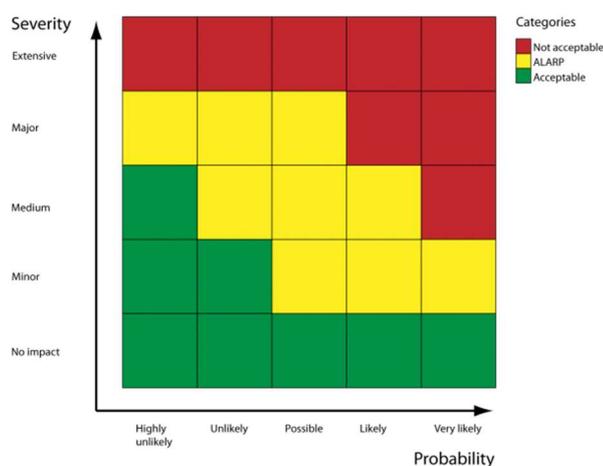
3.2. Matriz de Risco

A matriz de risco consiste em uma técnica que permite avaliar os riscos associados a um determinado contexto, sendo simples de ser empregada e com resultados de rápida e fácil interpretação para implementação de medidas de segurança. Para cada perigo, são definidas duas dimensões a serem analisadas: frequência de ocorrência e severidade da consequência. Por meio dessas categorias é possível calcular e visualizar a classificação do risco, que consiste na avaliação do impacto versus a probabilidade. A associação de frequências e de severidades pode ser feita de forma qualitativa ou quantitativa, onde a partir da classificação de todos os perigos, a matriz de riscos é construída (MARTINS; NATACCI, 2009).

Segundo Domínguez *et al.* (2019), a matriz de riscos (representada pela Figura 3) possui algumas vantagens e particularidades que a tornam uma técnica popular para análise de riscos, dentre elas tem-se:

- Técnica de fácil aplicação;
- Apresenta resultados seguros, com base nos dados registrados de eventos indesejáveis;
- Combina análise de risco com avaliação de risco;
- Pode ajudar na previsão de perigos, condições inseguras, eventos indesejáveis e consequências dos acidentes;
- Pode ser aplicado a qualquer situação que envolva riscos;
- É um método quantitativo e também gráfico que permite criar questões de responsabilidade e auxiliar na priorização e gestão dos principais fatores de riscos.

Figura 3 - Estrutura da Matriz de Risco



Fonte: (RISK *et al.*, 2009)

Segundo Napoleão (2019), alguns passos podem ser seguidos para elaboração de uma matriz de risco. Em cenários com grandes quantidades de riscos presentes, a matriz de riscos pode ser uma ferramenta eficaz para direcionar e priorizar os riscos mais críticos a serem tratados.

A princípio, para implementação de uma matriz de risco é necessário criar uma matriz adaptada de acordo com a problemática em questão. É preciso definir e descrever quais são os critérios que deverão classificar a probabilidade e a severidade do risco para a situação em análise.

Em seguida, é necessário identificar os riscos que serão abordados nas matrizes, onde para cada risco identificado é preciso analisar a sua probabilidade e impacto de acordo com os critérios definidos. Para que a avaliação dos riscos seja realista e precisa, é fundamental conhecer as características e particularidades dos mesmos. Os resultados da matriz podem auxiliar a identificar o nível real de impacto e probabilidade do risco sob avaliação.

Após a probabilidade e o impacto do risco terem sido definidos, seus valores podem ser inseridos na linha e coluna correspondentes da matriz de risco, obtendo assim a classificação do risco. De acordo com a classificação do risco, será viável determinar se ele deve ser priorizado ou não para tratamento.

3.3. LOPA

A análise LOPA é um método de avaliação semiquantitativo, de fácil aplicação, para a análise de cenários de acidentes que leva em consideração o evento de risco, as ameaças e as camadas de proteção propostas no modelo. Dessa forma, o LOPA busca identificar os diferentes conjuntos de elementos que tem o potencial de ocasionar o evento crítico, determinando as causas, consequências e estimando possíveis valores para o nível de risco, visando prevenir ou reduzir esse risco através do uso de camadas de proteção (XU *et al.*, 2018). O mesmo emprega uma simples regra de multiplicação para avaliar a eficácia das barreiras de proteção em diminuir as frequências dos cenários de acidentes ou resultados indesejados. Esta simples forma de implementação fez dele um recurso amplamente difundido para avaliação de riscos na última década (JIN *et al.*, 2016).

O LOPA avalia quantitativamente os riscos utilizando a frequência do evento inicial, a gravidade das consequências e a probabilidade de falha sob demanda das barreiras de proteção. Com a utilização desses dados de entrada, estima-se o risco envolvido em um cenário de acidente. O objetivo do LOPA é estimar os valores de risco em um determinado evento, servindo de base para que decisões sejam tomadas visando atingir níveis de risco toleráveis

para o usuário. Essa análise também pode ser usada para priorizar medidas de segurança em cenários de maior risco e para instalação de equipamentos que contribuem para redução dos níveis de risco (YUN; ROGERS; MANNAN, 2009).

A análise LOPA é fundamentada no conceito de camadas protetoras, que podem envolver equipamentos, procedimentos, recursos humanos, sistemas de proteção e dispositivos que podem ser automatizados ou iniciados de forma manual, sendo planejados para proteger contra o perigo iminente. Dessa forma, existem muitos tipos de camadas protetoras, onde um dado cenário pode requerer uma ou várias camadas de proteção, dependendo do tipo de processo e sua complexidade, gravidade das consequências e recursos envolvidos (KHALIL *et al.*, 2012).

Na análise LOPA é necessário definir a frequência alvo para a ocorrência do evento de risco, onde essa frequência deve estar dentro da faixa de risco tolerável definida pelo usuário. Os níveis de risco a serem alcançados podem variar de acordo com a estimativa da gravidade e análise das consequências de um evento indesejado. Devido a sua importância na análise de riscos, essa abordagem é comumente usada e pode ser personalizada de acordo com às perspectivas de segurança de cada usuário (GOWLAND, 2006).

A metodologia LOPA normalmente usa ordem de grandeza para definir a frequência dos eventos, severidade das consequências e probabilidade de falha das barreiras de proteção na avaliação de uma situação de risco. Inicialmente é necessário definir um cenário de risco, selecionando as causas e consequências que caracterizam o mesmo. Após essa etapa, estima-se a frequência do evento de risco e dos fatores causais do modelo, por meio dos dados históricos do cenário em questão. Além disso, é preciso avaliar para cada barreira de proteção do modelo sua probabilidade de falha sob demanda, como também estimar a frequência das consequências. Com isso, o risco pode ser obtido pelo produto da frequência de ocorrência com a probabilidade de falha das barreiras de proteção. Por fim, o risco é avaliado e comparado com as estimativas do nível de risco, até que os critérios de tolerância ao risco sejam atendidos (RAMÍREZ-MARENGO *et al.*, 2013).

O LOPA tem tido muito sucesso em auxiliar as organizações a entender e controlar os riscos, definindo de forma mais consistente as camadas de proteção necessárias para prevenir as ocorrências de eventos indesejados. As informações provenientes de uma análise LOPA podem ajudar a identificar o nível de desempenho das barreiras de proteção, sendo relevante para controlar os níveis de risco dos cenários avaliados. Portanto, o LOPA é uma ferramenta útil para implementar um gerenciamento abrangente de medidas de segurança que ajudam na

identificação de recursos e tarefas que são críticos para manter bons níveis de segurança (WEBER, 2006).

Segundo Alves (2007), algumas etapas podem ser implementadas para a aplicação da análise LOPA. Essas etapas são sintetizadas a seguir.

- **Identificar contexto do risco:** essa etapa consiste na identificação da temática a ser abordada na análise, onde é importante averiguar o contexto geral do risco e os recursos por ele influenciados.
- **Desenvolvimento do cenário de risco:** consiste na avaliação dos perigos presentes na situação em questão. Uma vez que o cenário de risco é definido, identifica-se os fatores causais, as consequências e as barreiras de proteção a serem consideradas no modelo de risco.

Essas duas etapas foram desenvolvidas na fase inicial do diagrama Bow-Tie, por onde o contexto do risco foi esclarecido e o cenário a ser abordado definido.

- **Estimar a frequência do evento de risco e fatores causais:** após os elementos de risco terem sido estabelecidos, estima-se a frequência para o evento crítico. Além disso, é calculada a frequência de ocorrência dos fatores causais que desencadeiam no evento principal.
- **Estimar as probabilidades de falha sob demanda:** as taxas de falhas das barreiras de proteção devem ser estimadas nessa etapa. Suposições podem estar envolvidas nesse processo, principalmente quando os dados são escassos, inconsistentes ou de difícil acesso. É importante que as suposições para as taxas de falhas sejam consistentes com a realidade do cenário em estudo. Os valores das PFD's são geralmente aproximados, podendo variar de probabilidades mais baixas (0,01) até mais altas (0,5). Quanto menor o valor da PFD, maior será a efetividade da barreira em prevenir a ocorrência do evento de risco.
- **Determinar a frequência total do evento de risco:** através do produtório entre a frequência de ocorrência das causas e a probabilidade de falha sob demanda, a frequência total do evento de risco pode ser calculada para os diferentes cenários em análise.

No presente trabalho foi realizada uma análise LOPA adaptada para o cenário de acidentes de trânsito, de modo que a análise engloba os vários fatores causais e barreiras de segurança em um único cenário de risco.

- **Avaliar o risco:** após a frequência total ter sido calculada, avalia-se o risco para determinar se o mesmo está dentro dos padrões de segurança toleráveis. Se o risco for inaceitável para o cenário em análise, novas barreiras de proteção devem ser adicionadas para se atingir um nível de risco admissível.

3.4. Análise descritiva

O uso da estatística é de grande relevância, principalmente pelo poder de informação que uma boa análise estatística pode fornecer, sendo utilizada em diferentes áreas de pesquisa nas mais variadas situações. A estatística é acobertada por vários softwares, que permitem analisar grandes bases de dados de forma a obter conclusões sobre as características e parâmetros de uma situação investigada. O tratamento de grandes bases de dados é importante para organizar, resumir e sintetizar as principais informações existentes que descrevem o comportamento de uma determinada situação, auxiliando dessa forma na tomada de decisão. Para isso, o processo de identificar padrões e regularidades nos dados pode permitir uma interpretação mais clara do fenômeno analisado (REIS, E. A.; REIS, 2002).

Assim sendo, a análise descritiva figura-se entre as técnicas estatísticas mais utilizadas, envolvendo a discriminação e descrição de aspectos qualitativos e quantitativos de um conjunto de dados. Essa análise dos dados enfatiza a exploração das informações originais, com o objetivo de simplificar a descrição dos dados através do resumo e organização dos mesmos, para assim obter uma visão mais profunda da sua natureza. Para realização das análises os dados precisam ser organizados, onde os mesmos podem ser sintetizados através de computadores, planilhas eletrônicas ou softwares estatísticos, independentemente do tamanho da base de dados. Os dados podem ser obtidos de diferentes fontes, seja de pesquisa de campo ou apenas registros de bases de dados. Com isso, pode-se extrair diversas informações de interesse através da aplicação de técnicas estatísticas adequadas (TRIOLA, 1999).

Para resumir e tratar os dados coletados, é necessário registrar as ocorrências das variáveis que caracterizam o fenômeno, para que dessa forma o conjunto de dados possa ser reduzido e interpretado, possibilitando assim a sua análise. As distribuições de frequência dessas variáveis poderão ter diferentes particularidades, a depender do nível de mensuração requerido e da quantidade de variáveis que serão analisadas (REIS, M. M., 2009).

A inferência estatística se preocupa com a análise dos dados e sua interpretação, consistindo em um conjunto de técnicas capaz de realizar afirmações sobre as características de um modelo probabilístico, que representa as propriedades e particularidades de uma determinada população (REIS, M. M., 2009). O emprego da inferência estatística também é

importante para obtenção de conclusões mais assertivas, visto que a mesma visa generalizar os resultados, estimar parâmetros desconhecidos, chegar a resultados concretos e auxiliar a tomada de decisão (DOANE; SEWARD, 2014).

4. FRAMEWORK PARA GESTÃO DE RISCO

O framework proposto neste trabalho é composto pelas seguintes etapas: i) estabelecimento do contexto geral da gestão de risco; ii) identificação das fontes de risco; iii) análise dos riscos envolvidos no evento principal; iv) avaliação de risco; v) tratamento do risco; vi) controle e gestão eficiente dos riscos. A estrutura do framework pode ser vista na Figura 4.

A primeira etapa do framework envolve o estabelecimento do contexto geral da situação a ser analisada, onde procura-se estabelecer os propósitos da gestão de risco, verificar quais as partes que podem ser afetadas de maneira adversa, além de realizar o planejamento das etapas subsequentes da análise de risco.

A segunda etapa refere-se à identificação das fontes de risco, onde analisa-se a situação de risco de forma mais detalhada, a fim de elencar possíveis fatores de risco que podem resultar na ocorrência de um evento crítico, que trará consequências negativas para as partes envolvidas no mesmo. Esse fenômeno é definido como o evento principal a ser abordado no modelo de risco. Dessa forma, essa etapa verifica as principais informações qualitativas e quantitativas disponíveis sobre o risco. Essa análise é importante, pois consegue mapear as causas e consequências do evento crítico, podendo priorizar os parâmetros mais relevantes de acordo com seus efeitos.

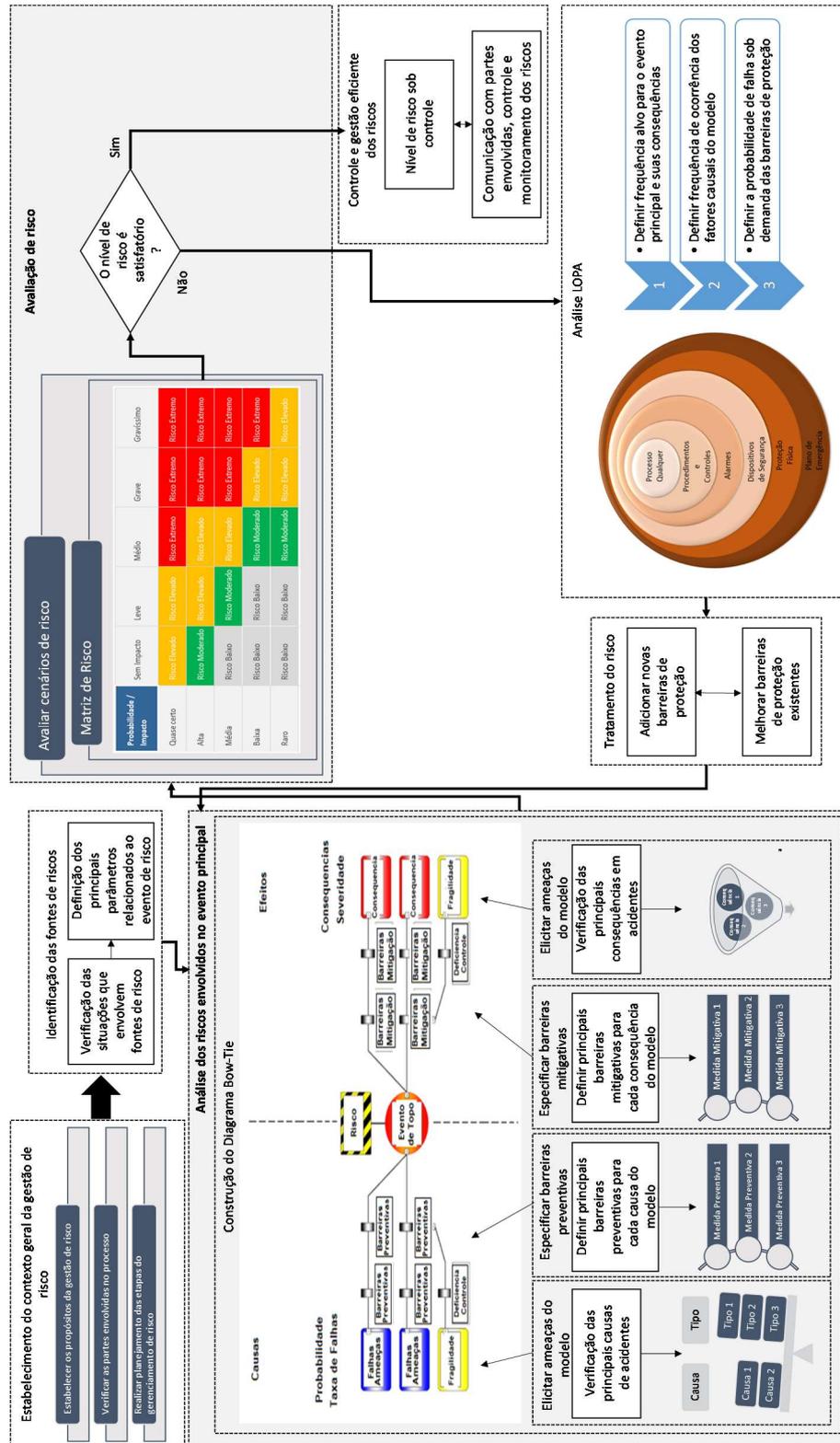
A próxima etapa é responsável pela análise dos riscos envolvidos no evento principal, onde aplica-se o diagrama Bow-Tie para visualizar os parâmetros presentes no cenário de risco. A princípio, deve-se utilizar as informações coletadas na etapa anterior para elicitar as ameaças e consequências do modelo em estudo. Após isso, para cada ameaça deve-se definir uma barreira preventiva. Da mesma forma, para cada consequência barreiras mitigativas são estabelecidas.

A quarta etapa do processo consiste na avaliação do nível de risco do cenário analisado, onde através das matrizes de risco é possível verificar se esse nível está dentro dos padrões satisfatórios de segurança. Para isso, as consequências devem ser avaliadas individualmente por meio de uma matriz de risco, para que possam ser vistos os cenários de alto e baixo riscos presentes no contexto em questão. Caso não haja cenários de alto risco, o nível de risco para as consequências está sob controle. Já para os casos em que os cenários de alto risco estão presentes, deve-se realizar o tratamento do risco.

O tratamento do risco corresponde a quinta etapa, onde busca-se reduzir os níveis de risco e incrementar os padrões de segurança da situação analisada. Para isso, parte-se para uma análise quantitativa dos riscos através da metodologia LOPA, onde as frequências de

ocorrências do evento principal e de seus fatores causais são estimadas. Além disso, as probabilidades de falha sob demanda das barreiras de proteção são definidas.

Figura 4 - Framework para Gestão de Risco



Fonte: Autor (2020)

A etapa final desse ciclo da análise LOPA corresponde a verificar se a frequência alvo para as ocorrências é atendida com as barreiras de proteção utilizadas. Para isto, o nível de risco do evento crítico estará sob controle. Já para os casos em que a frequência não é atendida, deve-se adicionar novas barreiras de proteção ou aperfeiçoar as existentes. Novamente, matrizes de risco são construídas para classificar os cenários de riscos das consequências após novas barreiras terem sido implementadas, de modo que a análise e gestão de risco só é concluída quando o nível de risco tolerável for alcançado.

Quando todas essas etapas forem concluídas, o sistema analisado irá se encontrar dentro dos padrões de segurança estabelecidos, onde todas as causas e consequências do evento principal serão conhecidas e as medidas de segurança a serem adotadas e controladas estarão disponíveis de forma visual no diagrama Bow-Tie.

4.1. Estudo de caso

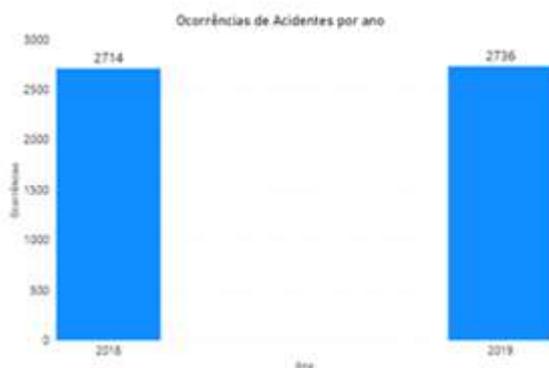
O presente tópico aborda o estudo de caso proposto para gerenciar os riscos envolvidos nos acidentes de trânsito, através da aplicação do diagrama Bow-Tie, Matriz de Risco e análise LOPA, seguindo a metodologia do framework desenvolvido.

4.1.1. Contexto geral dos acidentes de trânsito

A análise do contexto geral da acidentalidade nas rodovias mundiais e nacionais foi comentada na seção introdutória deste trabalho. Nela foi possível concluir que os acidentes de trânsito representam um fator importante a ser estudado, visto que se trata de um problema de saúde pública para diversos países, incluindo o Brasil. Os acidentes registrados causam diferentes tipos de consequências para suas vítimas, podendo variar desde ferimentos leves até casos mais graves, como a morte dos envolvidos. Diante disso, vários fatores podem desencadear na ocorrência dos acidentes, como as condições climáticas, estado de conservação da via, conduta do motorista, entre outros. Entender esses fatores de risco envolvidos nos acidentes pode contribuir de forma relevante para se intervir no fenômeno analisado, onde atividades preventivas e mitigatórias podem ser realizadas para diminuir os impactos causados pelo mesmo (DE ALMEIDA et al., 2013).

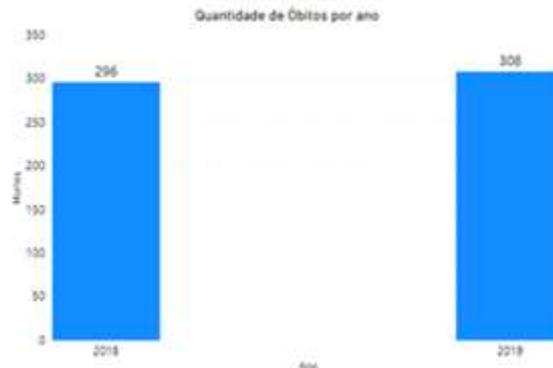
Analisando os acidentes nas rodovias federais de Pernambuco, tem-se os seguintes dados, dispostos na Figura 5, para as ocorrências registradas entre os anos de 2018 e 2019. Além disso, a Figura 6 sintetiza o número de óbitos entre as ocorrências registradas no intervalo de tempo em questão.

Figura 5 - Ocorrências de acidentes por ano



Fonte: Autor (2020)

Figura 6 - Óbitos por ano



Fonte: Autor (2020)

Os dados mostram que o ano de 2019 registrou 22 acidentes a mais do que em 2018, um aumento de cerca de 1%. Pode-se notar que o ano de 2019 apresenta maiores registros de mortes do que em 2018, contando com 12 óbitos a mais. Visto isso, é necessário reduzir esses números ao longo dos anos, o que reforça a necessidade de verificar os riscos envolvidos nos acidentes, para assim tratar os fatores causais e consequências presentes nos mesmos.

4.1.2. Identificação das fontes de risco

As fontes de risco presentes durante o tráfego de veículos nas rodovias podem variar de acordo com a rodovia, tipo de veículo, traçado da via, tipo de pista, fatores externos, entre outros. Apesar da variedade das fontes de risco, todas elas têm o potencial de resultar em acidentes de trânsito, umas com maior probabilidade do que outras. Sendo assim, como nas rodovias federais há inúmeras ameaças e fatores de risco que podem resultar em acidentes com consequências severas para os seus envolvidos, a realização de uma análise de risco é de grande relevância.

Para isso, é necessário definir a estrutura do evento de risco que será abordado durante a análise, de modo a conhecer e compreender melhor a problemática proposta. Logo, o evento principal consiste em analisar o risco de acidente ao trafegar com um automóvel ao longo de uma rodovia crítica do estado de Pernambuco, abordando algum trecho específico para análise.

Com o evento principal definido, é essencial analisar as suas informações qualitativas e quantitativas disponíveis, visto que os principais parâmetros envolvidos nos acidentes poderão ser elicitados. Para isso, as informações sobre as ocorrências de acidentes nas rodovias federais foram obtidas através dos registros presentes no portal do Departamento de Polícia Rodoviária Federal, onde é possível ter acesso a todos os acidentes que foram registrados nas rodovias federais do país em um intervalo de um ano, podendo obter esses dados desde 2007 à 2019. O

banco de dados do portal apresenta diversas variáveis para caracterizar a ocorrência registrada, sendo necessário a realização de uma seleção dos dados, de forma a englobar todos os parâmetros relevantes para posterior análise das informações.

Sendo assim, uma análise descritiva foi realizada para analisar, selecionar e interpretar os dados coletados, visto que os mesmos abordam todos os acidentes registrados no Brasil, sendo necessário a realização de uma filtragem dos dados para analisar os acidentes em Pernambuco. Além disso, é necessário verificar quais variáveis presentes nos acidentes registrados são mais relevantes para a ocorrência dos mesmos, possibilitando averiguar quais as principais causas, consequências, rodovias, tipos de veículos, entre outros parâmetros que estão diretamente relacionados ao risco de acidentes.

O presente estudo teve foco na análise dos dados referentes aos anos de 2017 a 2019, devido ao fato de os anos anteriores terem informações menos detalhadas sobre os acidentes registrados, não tendo tanta relevância e riqueza de detalhes para a análise como os anos mais recentes. A princípio, foram vistas as rodovias federais que apresentam mais ocorrências registradas durante o intervalo de tempo definido (2017-2019). Nesse tempo, 8892 acidentes foram contabilizados. O resultado sintetizado para as principais rodovias pode ser visto na Tabela 1.

Dessa tabela, pode-se notar que as BR's 101, 232 e 104 representam as três principais rodovias do estado com relação a ocorrência de acidentes, sendo responsáveis por 73,1% dos acidentes registrados. Essa análise pode ser mais detalhada quando a variável “estado físico das vítimas” passa a fazer parte do conjunto das variáveis consideradas, sendo possível haver óbitos, feridos graves, feridos leves e ilesos em cada acidente contabilizado. As ocorrências de cada estado físico ao longo das rodovias estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 1 - Acidentes por BR

BR	Acidentes	Freq. Relativa (%)	Freq. Acumulada (%)
101	3258	37%	37%
232	2727	31%	67%
104	520	6%	73%
428	504	6%	79%
423	447	5%	84%
408	353	4%	88%
407	290	3%	91%
424	281	3%	94%
316	269	3%	97%
116	171	2%	99%
110	58	1%	100%

Fonte: Autor (2020)

Tabela 2 - Ocorrências (Estado físico / BR)

Estado Físico / BR	101	104	110	116	232	316	407	408	423	424	428
Ileso	1299	195	23	54	1110	88	100	109	158	76	174
Lesões Graves	378	88	12	25	413	44	46	37	84	76	71
Lesões Leves	1239	180	12	65	916	83	111	151	129	83	193
Óbito	112	32	7	15	137	43	18	25	49	22	32

Fonte: Autor (2020)

Pode-se notar que a BR-232/PE apresenta mais ocorrências que resultam em consequências críticas para os envolvidos nos acidentes, onde a mesma se destaca como a rodovia com mais óbitos e feridos graves dentre todas as rodovias analisadas. Também merece destaque a BR-101, que é a segunda rodovia com maiores índices de óbitos e feridos graves. A mesma apresenta maiores registros de ilesos e feridos leves quando comparada com as demais rodovias do estado. Diante desses dados referentes as rodovias e estado físico das vítimas, selecionou-se a BR-232 para foco de estudo, devido a ser uma rodovia que apresenta grande fluxo diário de veículos e contém um número de óbitos expressivo dentre os acidentes de trânsito registrados. A seleção de uma rodovia específica para aplicação da metodologia Bow-Tie é necessária devido ao grande número de rodovias presentes, tornando-se inviável o estudo de todas elas no presente trabalho.

Com a definição da rodovia onde será centrada a análise, pode-se obter novos parâmetros que servirão de entrada para a aplicação do diagrama Bow-Tie e análise LOPA. Um parâmetro importante de se investigar são os tipos de veículos envolvidos nos acidentes. Para auxiliar essa análise, foram obtidos os principais veículos que estão presentes nas ocorrências registradas. Essas informações estão resumidas na Tabela 3.

Tabela 3 - Ocorrências entre tipos de veículos

Tipo de Veículo	Acidentes	Freq. Relativa (%)	Freq. Acumulada (%)
Automóvel	1100	41%	41%
Motocicleta	628	23%	64%
Caminhão	282	10%	75%
Caminhonete	277	10%	85%
Caminhão-trator	146	5%	90%
Camioneta	57	2%	92%
Utilitário	41	2%	94%
Ônibus	39	1%	95%
Motoneta	38	1%	97%
Micro-ônibus	33	1%	98%
Bicicleta	28	1%	99%
Ciclomotor	26	1%	100%

Fonte: Autor (2020)

Como pode-se notar, acidentes envolvendo automóveis, motocicletas e caminhões são mais frequentes. Além disso, quando se analisa os tipos de veículos com o estado físico das vítimas, essas três categorias são as mais frequentes nos estados físicos de óbito e ferimento

graves. Logo, é relevante concentrar as análises para uma categoria de veículos, de modo a realizar um tratamento de risco mais específico, com melhores resultados. Portanto, os automóveis serão a categoria abordada, visto que a mesma está presente na maioria das ocorrências com consequências mais graves.

Outra variável importante presente no banco de dados de acidentes é o tipo de pista em que a ocorrência foi registrada. Há três tipos de pista nas rodovias federais de Pernambuco, a pista dupla, simples e múltipla. Os dados referentes aos tipos de pista com mais casos contabilizados estão sintetizados na Tabela 4.

Tabela 4 - Ocorrências entre tipos de pistas

Tipos de Pistas	Ocorrências
Dupla	1450
Simple	1206
Múltipla	71

Fonte: Autor (2020)

Os resultados mostram que nas pistas duplas e simples ocorreram cerca de 97% dos acidentes de trânsito. Além disso, a pista simples obteve os maiores casos de óbitos e ferimentos graves entre os envolvidos nos incidentes.

As características das pistas podem ser de fundamental importância para entender as particularidades da mesma e sua ligação com os acidentes. Sendo assim, é válido verificar a relação entre o traçado da via e a ocorrência de acidentes. Os resultados dessa análise podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5 - Ocorrências nos traçados de via

Traçado da Via	Ocorrências
Reta	1917
Curva	322
Desvio Temporário	99
Interseção de vias	83
Retorno Regulamentado	36
Viaduto	36
Ponte	19
Rotatória	14
Túnel	2

Fonte: Autor (2020)

Pode-se notar que os principais traçados da via na ocorrência de acidentes são os traçados reto e curvo, que estão presentes em 89% dos casos registrados. Os mesmos também se destacam nos casos em que há consequências mais graves com os envolvidos.

Devido a extensão da BR232/PE ser muito grande (552 km), é importante a escolha de um trecho específico para realização das análises, visto que cada trecho da BR possui particularidades e características diferentes, o que dificulta a análise da rodovia em sua

totalidade. Diante disso, alguns trechos foram analisados, para assim escolher-se o mais crítico. O trecho escolhido tem uma extensão de 80 Km, compreendendo a faixa que vai do Km 49,9 até o Km 129,9. Este trecho foi escolhido devido ao fato de englobar um posto rodoviário federal no Km 71,5, facilitando dessa forma a aplicação de medidas de segurança ao longo de sua extensão. Foram registrados 814 acidentes no período analisado, o que mostra a criticidade desse local se comparado a outros trechos, como por exemplo o trecho 130-230, que apresentou 438 ocorrências no período considerado. Além disso, esse trecho corta algumas cidades importantes para o interior de Pernambuco, que movimentam a economia local e possuem grande fluxo de veículos nas rodovias, entre elas tem-se Vitória de Santo Antão, Gravatá, Bezerros e Caruaru, que juntas possuem um PIB médio de R\$ 12.349.703,12 (CONDEPE FIDEM, 2017).

Para a obtenção de resultados consistentes é importante elaborar e analisar um cenário específico, visto que há um número considerável de variáveis presentes nos acidentes de trânsito. Diante disso, levou-se em consideração as variáveis com maior frequência nas ocorrências mais críticas registradas nos últimos anos. Sendo assim, o evento crítico a ser avaliado nessa análise de risco corresponde aos acidentes de trânsito envolvendo automóveis no trecho 49,9-129,9 da BR232/PE, de modo a englobar os diferentes parâmetros presentes no contexto em questão.

4.1.3. Análise das causas e tipos de acidentes

Para conclusão da análise descritiva, é importante sintetizar as principais causas e tipos de acidentes, visto que são elementos cruciais para a construção do diagrama Bow-Tie, devido ao fato que são esses parâmetros que estarão presentes no lado esquerdo do diagrama, representando as principais ameaças que podem resultar no evento crítico, que nesse caso é a ocorrência do acidente de trânsito. As Tabelas 6 e 7 apresentam, respectivamente, todas as causas e tipos de acidentes que foram registrados ao longo de 2017 à 2019 nas rodovias federais de Pernambuco.

Tabela 6 - Principais causas de acidentes

Causas de Acidentes
Falta de Atenção à Condução
Desobediência às normas de trânsito pelo condutor
Ingestão de Álcool
Não guardar distância de segurança
Defeito Mecânico no Veículo
Falta de Atenção do Pedestre
Animais na Pista
Velocidade Incompatível
Condutor Dormindo
Defeito na Via
Ultrapassagem Indevida
Pista Escorregadia
Mal Súbito
Avarias e/ou desgaste excessivo no pneu
Objeto estático sobre o leito carroçável
Ingestão de álcool e/ou substâncias psicoativas pelo pedestre
Restrição de Visibilidade
Agressão Externa
Sinalização da via insuficiente ou inadequada
Fenômenos da Natureza
Carga excessiva e/ou mal acondicionada
Desobediência às normas de trânsito pelo pedestre
Ingestão de Substâncias Psicoativas
Deficiência ou não Acionamento do Sistema de Iluminação/Sinalização do Veículo

Fonte: PRF (2019)

Tabela 7 - Principais tipos de acidentes

Tipos de Acidentes
Colisão traseira
Saída de leito carroçável
Colisão lateral
Colisão transversal
Atropelamento de Pedestre
Colisão frontal
Colisão com objeto estático
Capotamento
Atropelamento de Animal
Tombamento
Queda de ocupante de veículo
Incêndio
Engavetamento
Derramamento de carga
Colisão com objeto em movimento
Danos eventuais

Fonte: PRF (2019)

A análise de ocorrência desses parâmetros foi feita de forma desagregada para cada ano, visando dessa forma entender as particularidades e as tendências das causas e tipos mais frequentes ao longo dos últimos anos. Começando com o ano de 2017, as cinco principais causas de acidentes estão dispostas na Tabela 8.

Tabela 8 - Causas de acidentes (2017)

Causas de Acidentes	Ocorrências	%
Falta de Atenção à Condução	411	37%
Não guardar distância de segurança	97	9%
Animais na Pista	92	8%
Ingestão de Álcool	88	8%
Defeito Mecânico no Veículo	67	6%

Fonte: Autor (2020)

Da Tabela 8 pode-se notar que a falta de atenção a condução esteve presente em 37% dos acidentes registrados, sendo uma das principais causas a serem analisadas para aplicação de medidas preventivas de segurança. Analisando os tipos de acidentes mais frequentes, a colisão traseira destaca-se como a que obteve mais registros, estando presente em 22% dos acidentes registrados. Os dados referentes a esse parâmetro estão sintetizados na Tabela 9.

Tabela 9 - Tipos de acidentes (2017)

Tipos de Acidentes	Ocorrências	%
Colisão traseira	252	22%
Colisão lateral	130	12%
Saída de leito carroçável	121	11%
Colisão transversal	119	11%
Capotamento	99	9%

Fonte: Autor (2020)

Por fim, é interessante observar que cada causa de acidente tem um tipo de acidente atrelado, onde os tipos de incidentes representam uma consequência direta para determinada causa, como por exemplo, a causa “ultrapassagem indevida” pode resultar no tipo de acidente “colisão frontal”. Dessa forma, é considerável analisar quais os tipos de acidentes que são mais frequentes entre as diferentes opções de causas que foram registradas no banco de dados. Essa informação está disposta na Tabela 10.

Tabela 10 - Tipos mais frequentes entre as causas (2017)

Tipos de Acidentes	Ocorrências entre as Causas	%
Colisão com objeto estático	16	76%
Colisão traseira	15	71%
Saída de leito carroçável	15	71%
Capotamento	14	67%
Colisão frontal	14	67%

Fonte: Autor (2020)

A Tabela 10 mostra que a colisão com objeto estático está presente em 16 diferentes causas de acidentes, que representam 76% das causas consideradas. Essa informação é relevante, pois mostra que a colisão com objeto estático é uma das principais variáveis presentes na ocorrência de um acidente de trânsito, sendo comumente registrada em uma grande variedade de causas de acidente.

A mesma análise é feita para os demais anos considerados. No ano de 2018, os resultados obtidos encontram-se dispostos nas Tabelas 11, 12 e 13.

Tabela 11 - Causas de acidentes (2018)

Causas de Acidentes	Ocorrências	%
Falta de Atenção à Condução	284	36%
Desobediência às normas de trânsito pelo condutor	72	9%
Ingestão de Alcool	69	9%
Não guardar distância de segurança	63	8%
Animais na Pista	43	5%

Fonte: Autor (2020)

Tabela 12 - Tipos de acidentes (2018)

Tipos de Acidentes	Ocorrências	%
Colisão traseira	178	23%
Colisão lateral	103	13%
Saída de leito carroçável	101	13%
Colisão transversal	74	9%
Colisão frontal	68	9%

Fonte: Autor (2020)

Tabela 13 - Tipos mais frequentes entre as causas (2018)

Tipos de Acidentes	Ocorrências entre as Causas	%
Saída de leito carroçável	20	87%
Capotamento	15	65%
Colisão traseira	13	57%
Colisão lateral	12	52%
Colisão com objeto estático	12	52%

Fonte: Autor (2020)

Para o ano de 2019, os resultados estão sintetizados nas tabelas 14, 15 e 16.

Tabela 14 - Causas de acidentes (2019)

Causas de Acidentes	Ocorrências	%
Falta de Atenção à Condução	283	35%
Desobediência às normas de trânsito pelo condutor	81	10%
Ingestão de Alcool	80	10%
Não guardar distância de segurança	52	6%
Defeito Mecânico no Veículo	43	5%

Fonte: Autor (2020)

Tabela 15 - Tipos de acidentes (2019)

Tipos de Acidentes	Ocorrências	%
Colisão traseira	174	21%
Saída de leito carroçável	106	13%
Colisão lateral	104	13%
Colisão transversal	86	11%
Atropelamento de Pedestre	65	8%

Fonte: Autor (2020)

Tabela 16 - Tipos mais frequentes entre as causas (2019)

Tipos de Acidentes	Ocorrências entre as Causas	%
Colisão traseira	17	71%
Saída de leito carroçável	16	67%
Tombamento	13	54%
Queda de ocupante de veículo	13	54%
Colisão com objeto estático	12	50%

Fonte: Autor (2020)

Pode-se concluir dessa análise que as causas de acidentes mais comuns ao longo dos anos são a falta de atenção a condução, ingestão de álcool e não guardar distância de segurança, onde as mesmas estão entre as cinco principais causas nos três anos analisados. Olhando os tipos de acidentes mais frequentes, merecem destaque as colisões traseira, lateral e transversal, além da saída do leito carroçável. Esses tipos de acidentes se destacam como as principais consequências dos incidentes registrados nos últimos três anos. Por fim, dentro dos tipos de acidentes mais frequentes entre as causas, a colisão traseira e a saída do leito carroçável estão presentes na grande maioria das causas de acidentes, mostrando serem resultados frequentes e que merecem atenção para a adoção de medidas preventivas em prol da segurança nas rodovias federais.

4.2. Análise de riscos

A análise dos riscos envolvidos no evento principal é realizada por meio da ferramenta de gerenciamento de risco Bow-Tie, por onde é possível visualizar diferentes cenários e analisar as principais causas e consequências que os acidentes trazem para os indivíduos, verificando as barreiras proativas e reativas utilizadas para evitar e reduzir os danos causados pelos acidentes de trânsito.

4.2.1. Implementação do diagrama Bow-Tie

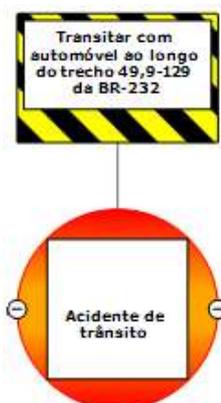
Após o evento principal ter sido definido, é necessário elencar as causas que podem levar a ocorrência do mesmo. Além disso, as consequências desse evento devem ser estabelecidas. Sendo assim, para a construção do diagrama Bow-Tie no contexto dos acidentes de trânsito, é preciso definir as principais causas e tipos de acidentes que vem sendo registrados no cenário abordado. A análise descritiva dos acidentes serviu de base para a construção do diagrama, onde foi possível verificar as principais características dos acidentes no trecho analisado.

Para desenvolvimento do diagrama, o software *BowTieXP* foi utilizado. O *BowTieXP* é um dos softwares mais utilizados para análise de risco baseado na metodologia Bow-Tie, permitindo elaborar conjuntamente diagramas Bow-Tie e a análise LOPA para verificar os diversos fatores de riscos presentes na problemática em estudo.

Com o cenário definido, as particularidades que englobam as situações mais críticas em acidentes de trânsito puderam ser abordadas. Dentro da análise foram verificadas a robustez e efetividade das barreiras de segurança, visando aferir se as mesmas são capazes de diminuir a

probabilidade de ocorrência do evento crítico e suas consequências. Diante disso, a estrutura do evento principal a ser tratado na análise de risco pode ser visualizada na Figura 7.

Figura 7 - Evento principal



Fonte: Autor (2020)

O cenário proposto analisa os acidentes de trânsito envolvendo automóveis ao longo do trecho 49,9-129,9 da BR232/PE. Sendo assim, as principais causas e tipos dos acidentes registrados representam as ameaças do modelo Bow-Tie, onde através do banco de dados dos acidentes foi possível identificar as principais variáveis causais presentes no cenário em análise. As causas e tipos de acidentes mais frequentes identificadas são mostradas na Tabela 17.

Tabela 17 - Causas e tipos mais frequentes nos acidentes

Causas	Tipos
Falta de Atenção à Condução	Colisão traseira
Velocidade Incompatível	Saída de leito carroçável
Pista Escorregadia	Saída de leito carroçável
Desobediência às normas de trânsito pelo condutor	Colisão traseira
Defeito Mecânico no Veículo	Saída de leito carroçável
Condutor Dormindo	Colisão com objeto estático
Ingestão de Álcool	Saída de leito carroçável
Animais na Pista	Atropelamento de Animal
Falta de Atenção do Pedestre	Atropelamento de Pedestre
Defeito na Via	Saída de leito carroçável

Fonte: Autor (2020)

Logo, essas causas e tipos estão contidas na maioria dos acidentes do cenário proposto, sendo responsáveis pela ocorrência do evento principal. Após serem identificadas as ameaças, torna-se necessário estabelecer as consequências provenientes do evento crítico.

Como os acidentes geralmente resultam em consequências recorrentes para todas as ocorrências registradas, há um leque de opções pré-definido para representar os eventuais danos causados por um acidente de trânsito. Segundo Filho (2011), os acidentes de trânsito podem acarretar em diversas consequências, envolvendo os campos físico, psicológico, econômico, político, social, cultural, com todos eles tendo impacto direto sobre a vida dos envolvidos. De maneira abrangente, os acidentes podem ter as seguintes consequências para suas vítimas:

- Impacto do acidente nos ocupantes: representa as consequências finais ao estado físico/mental dos envolvidos, podendo envolver mortes, sequelas, incapacidades, traumatismos ou danos psicológicos, configurando os impactos indiretos e secundários aos envolvidos no acidente.
- Lesões aos envolvidos: representa as consequências intrínsecas ao estado físico dos envolvidos, podendo envolver ferimentos leves, moderados ou lesões graves, caracterizando as consequências diretas aos envolvidos no acidente.
- Danos a terceiros: geralmente envolvem danos ao patrimônio público ou privado, impactando pessoas que não estavam diretamente envolvidas no acidente, mas que sofrem com as consequências do mesmo;
- Prejuízos financeiros: representa o considerável impacto econômico que os acidentes causam ao governo, especialmente para o setor de saúde, e a sociedade em geral. Segundo o relatório desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), em 2014 os custos associados às pessoas nos acidentes em rodovias federais foram de R\$ 7.950.904.442. Esse custo envolveu despesas hospitalares, atendimento as vítimas, tratamento de lesões, remoção das vítimas do local do acidente (IPEA, 2015).

Após definir as ameaças e consequências do evento principal, é necessário estabelecer as barreiras preventivas e mitigatórias para completar o diagrama Bow-Tie. As barreiras preventivas irão representar as medidas de segurança utilizadas para prevenir a ocorrência do evento crítico, onde para cada ameaça estabelecida no modelo é necessário definir uma ou mais barreiras de proteção. Já as barreiras mitigativas representam as medidas utilizadas para diminuir o impacto da ocorrência do evento principal. Da mesma forma, para cada consequência definida no modelo é necessário elencar uma ou mais barreiras mitigativas para amenizar os danos causados pelas mesmas.

Segundo o relatório de direção defensiva para prevenção dos acidentes, desenvolvido pelo Departamento de Trânsito do Paraná (DETRAN-PR), existem medidas que quando praticadas conscientemente ajudam a evitar e mitigar as consequências dos acidentes. Essas medidas de prevenção e mitigação devem ser aplicadas nas atividades de trânsito, para assim se obter resultados satisfatórios com relação a acidentalidade nas rodovias (LERNER, 1996).

Dessa forma, o relatório do DETRAN-PR mostra que para cada causa de acidentes, algumas medidas preventivas podem ser utilizadas. Portanto, as ameaças consideradas no

cenário de risco podem ser relacionadas a algumas dessas medidas. Essas barreiras preventivas a serem adotadas em cada fator causal do modelo estão sintetizadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Barreiras preventivas para cada ameaça do modelo

Causas	Tipo	Barreiras Preventivas
Falta de Atenção à Condução	Colisão traseira	Fiscalização em trechos críticos Treinamento direção defensiva Sensor de Profundidade
Velocidade Incompatível	Saída de leito carroçável	Fiscalização em trechos críticos
Pista Escorregadia	Saída de leito carroçável	Manutenção da via
Desobediência às normas de trânsito pelo condutor	Colisão traseira	Fiscalização em trechos críticos
Defeito Mecânico no Veículo	Saída de leito carroçável	Manutenção preventiva Fiscalização em trechos críticos
Condutor Dormindo	Colisão com objeto estático	Sistema Sleep Alarm
Ingestão de Alcool	Saída de leito carroçável	Campanha de conscientização Fiscalização em trechos críticos
Animais na Pista	Atropelamento de Animal	Cercamento das rodovias
Falta de Atenção do Pedestre	Atropelamento de Pedestre	Campanha de conscientização
Defeito na Via	Saída de leito carroçável	Manutenção da via

Fonte: Autor (2020)

Também existem algumas medidas de segurança que podem ser abordadas para reduzir os impactos gerados pelas consequências do evento de risco. Essas barreiras mitigativas podem ser elicitadas para cada consequência do modelo, onde as mesmas encontram-se dispostas na Tabela 19.

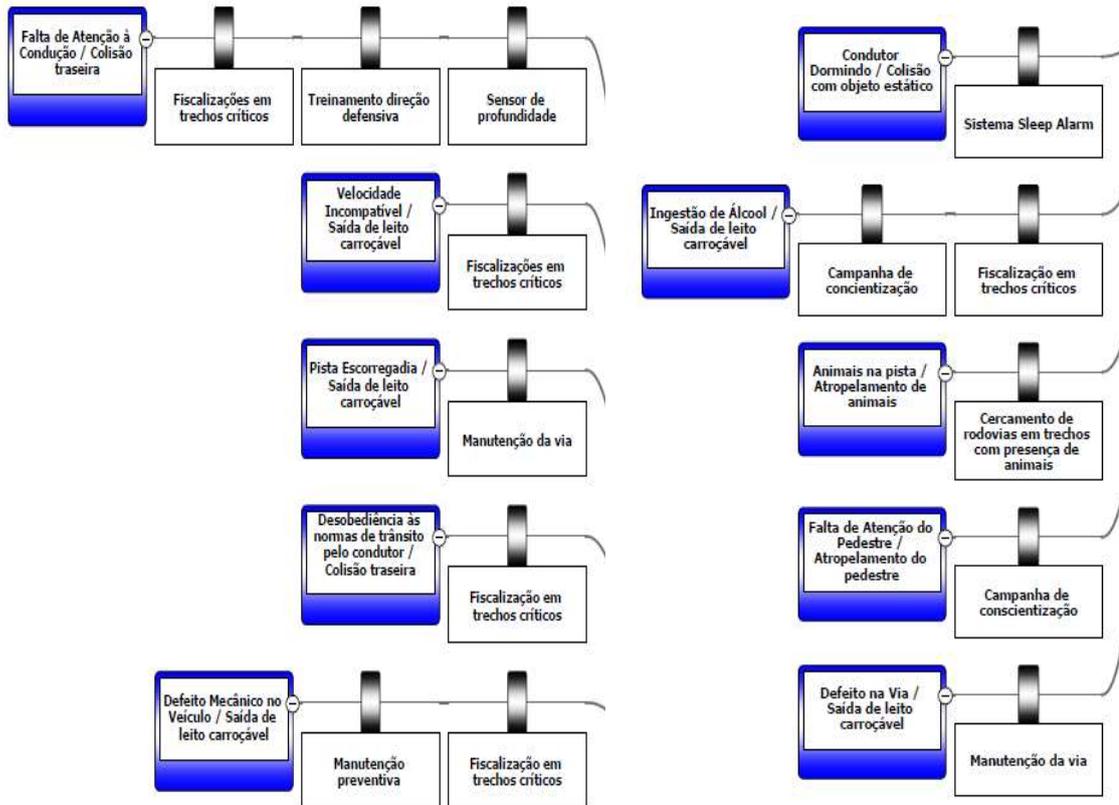
Tabela 19 - Barreiras mitigativas para as consequências do modelo

Consequências	Barreiras Mitigativas
Impacto do acidente nos ocupantes	Uso de cinto de segurança Airbags
Lesões aos envolvidos	Seguro de vida Uso de cinto de segurança Airbags
Danos a terceiros	Seguro a terceiros
Prejuízos financeiros	Seguro do veículo

Fonte: Autor (2020)

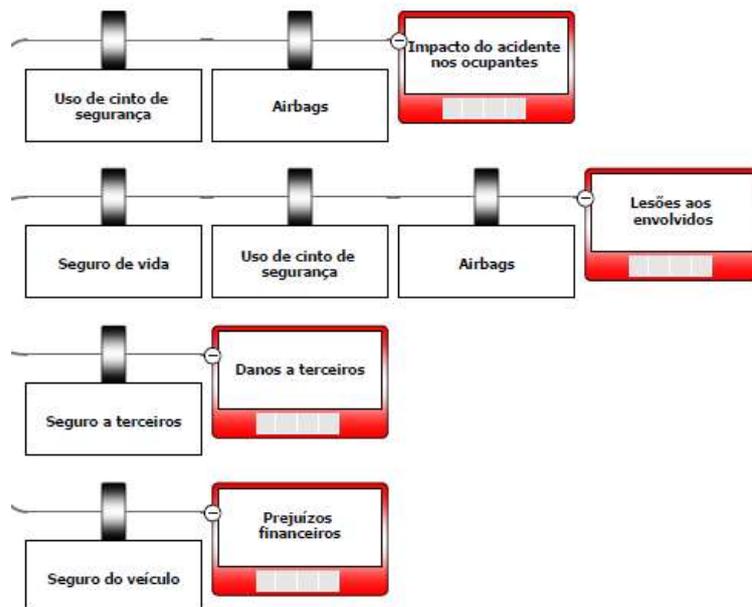
Após todas as barreiras de proteção serem determinadas, a estrutura do diagrama Bow-Tie está completa. As Figuras 8 e 9 representam, respectivamente, o lado das ameaças do diagrama Bow-Tie, onde os fatores causais e as barreiras preventivas estão definidas; e o lado das consequências, onde as barreiras mitigativas e os efeitos do evento de risco estão sintetizados.

Figura 8 - Ameaças do diagrama Bow-Tie



Fonte: Autor (2020)

Figura 9 - Consequências do diagrama Bow-Tie



Fonte: Autor (2020)

4.3. Avaliação de risco

A avaliação dos riscos envolvidos no evento principal pode melhorar os padrões de segurança do cenário em análise, onde utiliza-se matrizes de risco para verificar o nível do impacto causado pelas consequências do modelo.

4.3.1. Matriz de Risco

Como as consequências provenientes do evento principal já foram sintetizadas anteriormente, pode-se avaliar cada uma por meio das matrizes de risco. A princípio, é necessário definir e descrever os critérios que classificam os parâmetros da matriz, que são a probabilidade e severidade do risco para a situação em análise. Para a probabilidade do risco, os seguintes critérios foram estabelecidos na Tabela 20.

Tabela 20 - Critérios para a probabilidade do risco

Probabilidade	
Nível	Descrição dos critérios de probabilidade (cenário das consequências)
Muito baixa	$FTC < 1,0 * 10^{-10}$
Baixa	$1,0 * 10^{-10} < FTC < 1,0 * 10^{-9}$
Média	$1,0 * 10^{-9} < FTC < 1,0 * 10^{-8}$
Alta	$1,0 * 10^{-8} < FTC < 1,4 * 10^{-8}$
Muito alta	$FTC > 1,4 * 10^{-8}$

Fonte: Autor (2020)

Para o parâmetro de probabilidade da Matriz de Risco foi utilizado a frequência total de consequência (*FTC*) para descrever os critérios da matriz. A *FTC* abordada nas matrizes de risco envolve a frequência de ocorrência do evento principal e as probabilidades das consequências para realizar a estimativa da frequência de ocorrência de cada consequência do modelo. O procedimento para cálculo da *FTC* será relatado no tópico a seguir, referente a análise LOPA.

Vale salientar que a escolha do critério de probabilidade e seus devidos intervalos para cada nível foram definidos de forma subjetiva pelo decisor do modelo, de modo a representar de maneira coerente as ocorrências das consequências para o cenário analisado. Sendo assim, as escalas de valores do *FTC* foram estabelecidas pelo julgamento do decisor perante as frequências das variáveis de consequência e a ordem de grandeza dos dados trabalhados.

Para a severidade do risco, os critérios determinados estão sintetizados na Tabela 21.

Tabela 21 - Critérios para o impacto do risco

Impacto	
Nível	Descrição dos critérios de impacto (cenário das consequências)
Muito baixo	As consequências são pouco significativas
Baixo	As consequências podem ser reversíveis e possuem caráter leve
Médio	As consequências podem ser reversíveis e possuem caráter moderado
Alto	As consequências podem ser reversíveis e possuem caráter crítico
Muito alto	As consequências são irreversíveis e possuem caráter crítico

Fonte: Adaptado Napoleão (2019)

Com os critérios descritos, parte-se para a construção da matriz de risco para cada consequência. A Tabela 22 apresenta as consequências do modelo e sua correspondente nomenclatura adotada na construção da matriz de risco.

Tabela 22 – Consequências do modelo

Consequências	
Consequência 1	Impacto dos acidentes nos ocupantes
Consequência 2	Lesões aos envolvidos
Consequência 3	Danos a terceiros
Consequência 4	Prejuízos financeiros

Fonte: Autor (2020)

A matriz de risco global para as consequências do modelo pode ser vista na Figura 10, onde os números correspondentes de cada consequência estão dispostos na mesma.

Figura 10 - Matriz de risco global para as consequências

Matriz de risco		Impacto				
		Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
Probabilidade	Muito baixa					
	Baixa					
	Média		3			
	Alta		2			
	Muito alta			1	4	

Fonte: Autor (2020)

Como a maioria dos acidentes causam impactos nos seus ocupantes, sejam eles traumas físicos ou psicológicos, a consequência 1 (impacto dos acidentes nos ocupantes) ocorre de forma corriqueira. O *FTC* dessa consequência possui o valor de $1,4422 \cdot 10^{-8}$, sendo definido com um nível de probabilidade muito alto na matriz. Analisando o impacto, a maioria das ocorrências registradas (62%) resultam em vítimas com algum tipo de ferimento, onde há uma incidência maior de ferimentos leves dentre os envolvidos. Além disso, deve-se levar em conta o impacto que os acidentes podem causar no estado psicológico das vítimas. Dessa forma, pode-se considerar um impacto médio na matriz de risco, visto que a maioria dos casos possuem consequências de caráter moderado.

Seguindo as análises, o *FTC* para a consequência 2 (lesões aos envolvidos) possui o valor de $1,0016 \cdot 10^{-8}$, sendo definido com um nível de probabilidade alto na matriz. Analisando o número total de envolvidos nos acidentes, há uma incidência maior de ilesos (50%), seguido por feridos leves (33%), feridos graves (12%) e mortos (5%). Sendo assim, pode-se considerar um impacto baixo para essa consequência, visto que a maioria dos casos possuem consequências de caráter leve.

O *FTC* para a consequência 3 (danos a terceiros) possui o valor de $3,6056 \cdot 10^{-9}$, representando um nível de probabilidade médio na matriz. Analisando a severidade do impacto,

na maioria dos casos a mesma resulta em consequências leves, muitas vezes ligada a aspectos financeiros. Portanto, pode-se considerar um impacto baixo.

Por fim, para a consequência 4 (prejuízos financeiros) foi visto que na maioria dos acidentes de trânsito há prejuízos financeiros para os seus envolvidos, onde o *FTC* da consequência em análise possui o valor de $1,9029 * 10^{-8}$, que caracteriza um nível de probabilidade muito alto na matriz. Foi visto que os acidentes causam grandes despesas ao governo e a sociedade em geral, especialmente para o setor público de saúde. Sendo assim, pode-se considerar um impacto alto para essa consequência.

De acordo com a classificação do risco para cada consequência, foi visto que as consequências 1 (impacto do acidente nos ocupantes) e 4 (prejuízos financeiros) apresentam cenários de alto risco, estando localizadas na faixa crítica da matriz. Logo, essas consequências devem ser priorizadas no tratamento de risco, para assim mitigar os cenários críticos do modelo analisado.

4.3.2. Análise LOPA

O resultado da avaliação dos riscos pôde mostrar que o nível de risco não é satisfatório para o cenário analisado, onde é indicado a utilização da análise LOPA para verificar a eficácia das barreiras de proteção, visando adicionar novas barreiras para atingir o nível de risco tolerável.

Com a estrutura do Bow-Tie formada, pode-se verificar a eficiência do modelo com relação aos padrões de risco toleráveis. Para isso, uma análise LOPA foi realizada. O LOPA pode ser visto como uma extensão das análises de risco qualitativas, sendo um método objetivo para avaliar riscos e cenários comparando-os com critérios de tolerância a riscos para decidir se as barreiras existentes são adequadas ou se são necessárias proteções adicionais.

O objetivo dessa análise LOPA é determinar se as camadas de proteção são suficientes para conter o risco de ocorrência de acidente no cenário proposto, para assim resultar em um risco tolerável, visto que um cenário pode exigir uma ou mais camadas de proteção, dependendo das causas presentes e da severidade das consequências. Em alguns casos apenas uma camada de proteção deve funcionar bem para evitar as consequências, porém, dado que nenhuma camada de proteção é totalmente efetiva, deve-se providenciar camadas suficientes para alcançar um nível de risco aceitável.

Para o desenvolvimento da análise LOPA, é necessário estimar a frequência do evento de risco, a frequência de ocorrência dos fatores causais do modelo e a probabilidade de falha sob demanda das barreiras de proteção. Com esses três parâmetros definidos, é possível

verificar se os valores de risco presentes na situação analisada estão dentro da faixa de risco tolerável, onde importantes decisões podem ser tomadas com base nos resultados obtidos.

O cálculo das frequências relativas das causas e do evento de risco dispostos no diagrama Bow-Tie foram realizadas por meio da base de dados de acidentes presentes no portal do Departamento de Polícia Rodoviária Federal. A partir da obtenção dos dados, os mesmos foram tabulados e através do seu tratamento foi possível obter os valores de frequência para o evento de risco considerado e suas potenciais causas.

Sendo assim, ao começar com uma análise LOPA é fundamental definir a frequência de ocorrência para o evento de risco/principal e suas consequências. O cálculo dessa frequência envolve o número de acidentes registrados durante o intervalo de um ano, a extensão do trecho considerado e o volume médio diário de veículos que circulam por esse trecho em análise. O volume médio diário (VMD) de veículos que transitam pelas rodovias pode ser obtido através dos dados fornecidos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, onde é possível encontrar informações relevantes e atualizadas do tráfego rodoviário em cada segmento da malha rodoviária federal pavimentada. Diante disso, através da filtragem desses dados é possível saber a estimativa do volume médio diário de tráfego nas rodovias federais de Pernambuco. Dessa forma, a frequência de ocorrência de um evento de risco em um determinado trecho pode ser calculada pela Equação 1:

$$FO = \frac{\text{Acidentes registrados}}{\text{VMD} \times 365 \times (\text{extensão do trecho})} \quad (1)$$

onde, FO é a frequência de ocorrência do evento de risco e o VMD é o volume médio diário de veículos, onde o mesmo é multiplicado por 365 para estimar o volume médio anual de veículos.

Após atribuir as frequências para o evento de risco, é necessário definir as frequências relacionadas aos elementos de ameaça (causas) do modelo. Para realizar esse cálculo são necessárias a frequência relativa para cada ameaça e a frequência de ocorrência do evento de risco.

Segundo Sampaio *et al.* (2018), a frequência relativa para um dado parâmetro i , denotada por f_i , pode ser definida pela Equação 2:

$$f_i = \frac{F_i}{n} \quad (2)$$

onde F_i representa a frequência absoluta para cada elemento e n é o tamanho da amostra.

Com essas informações, as frequências de ocorrências para cada causa podem ser obtidas pelo produto da frequência relativa de cada elemento de ameaça com a frequência de ocorrência do evento de risco. A Equação 3 retrata essa frequência de ocorrências.

$$FC_i = f_i \times FO \quad (3)$$

onde FC_i é a frequência de ocorrência para a causa i , f_i representa a frequência relativa do elemento causal i ; e FO simboliza a frequência de ocorrência do evento de risco.

Por fim, é necessário determinar a efetividade das barreiras de segurança na contenção do evento de risco e suas consequências, estimando a probabilidade de falha sob demanda ($PF D$). Para definir a $PF D$ de cada barreira considerada no diagrama Bow-Tie foram estabelecidos três valores para retratar as taxas de falha, seguindo o modelo proposto em ALVES (2007), podendo representar uma eficácia alta, média ou baixa de cada barreira de proteção. As taxas utilizadas e a sua descrição estão sintetizadas na Tabela 23.

Tabela 23 - Descrição das PFD's a serem utilizadas

PFD	Descrição
0,01 (1%)	Barreira de proteção com alta eficácia
0,2 (20%)	Barreira de proteção com eficácia moderada
0,5 (50%)	Barreira de proteção com baixa eficácia

Fonte: Autor (2020)

Quando todas as frequências forem calculadas para os elementos do diagrama Bow-Tie, verifica-se se as frequências inseridas atendem os níveis de risco definidos como alvo, sendo esse nível estabelecido previamente pelo decisor do modelo. Se os resultados do modelo estiverem fora da margem de risco, novas barreiras de proteção devem ser adicionadas até se chegar em valores toleráveis de risco.

O cálculo envolvido na análise LOPA estabelece a frequência total do evento topo para o cenário em questão. Essa frequência é obtida pelo somatório do produto de cada frequência causal com as respectivas $PF D$'s das barreiras de proteção atreladas. A expressão para obter a frequência total do evento topo é sintetizada na Equação 4.

$$FT = \sum_{i=1}^n FC_i \prod_{j=1}^k PFD_j \quad (4)$$

onde FT é a frequência total para o evento topo, FC_i representa a frequência de ocorrência para a causa i ; e $PF D_j$ simboliza a probabilidade de falha sob demanda da barreira de proteção j . Os valores de i podem variar de 1 até n , representando os elementos causais do modelo. Já os valores de j podem variar de 1 até k , simbolizando as barreiras de proteção interligadas a uma determinada causa i .

Já para o lado das consequências, o cálculo realizado envolve o estabelecimento da frequência total para as consequências $FT C$. Essa frequência é obtida pelo produto da frequência total do evento topo com a probabilidade de ocorrência da consequência e as respectivas $PF D$'s das barreiras mitigativas atreladas a mesma. A expressão para obter essa frequência total para cada consequência é sinalizada na Equação 5.

$$FT C_i = FT * PC_i \prod_{j=1}^k PFD_j \quad (5)$$

onde FTC_i é a frequência total para cada consequência i , FT representa a frequência total para o evento topo; PC_i é a probabilidade para cada consequência i ; e PFD_j simboliza a probabilidade de falha sob demanda da barreira de proteção j . Os valores de j podem variar de 1 até k , simbolizando as barreiras de proteção mitigativas interligadas a uma determinada consequência i .

Com isso, o nível de risco estará sob controle se a frequência alvo do evento crítico (FA) for maior que a frequência total do evento topo (FT), calculada pelo produto das frequências causais e as taxas de falha das barreiras de proteção. Sendo assim, a seguinte condição deve ser satisfeita para obter-se um controle efetivo dos riscos, conforme mostrada na Equação 6.

$$FA > FT \quad (6)$$

Após as informações sobre as estimativas de frequência do evento de risco, fatores causais, consequências e probabilidade de falhas das barreiras de proteção terem sido explanadas, pode-se aplicar esses conceitos para o contexto analisado. Logo, as frequências relativas do evento principal, dos fatores causais do modelo e as probabilidades das consequências estão sintetizadas nas Tabelas 24, 25 e 26.

Tabela 24 - Frequências de ocorrência para o evento principal

Evento principal	Ocorrências registradas	VMD	Extensão do trecho	Frequência de ocorrência do evento crítico (FO)
Acidentes com automóveis no trecho 49,9-129,9 da BR-232	117	10191	80 km	$3,9 * 10^{-7}$

Fonte: Autor (2020)

Tabela 25 - Frequências de ocorrência das ameaças

Causas / Tipo	Frequência relativa (f_i)	Frequência de ocorrência das Causas/Tipo (FC_i)
Falta de Atenção à Condução / Colisão traseira	0,082	$3,24 * 10^{-8}$
Velocidade Incompatível / Saída de leito carroçável	0,034	$1,34 * 10^{-8}$
Pista Escorregadia / Saída de leito carroçável	0,026	$1,00 * 10^{-8}$
Desobediência às normas de trânsito pelo condutor / Colisão traseira	0,020	$7,84 * 10^{-9}$
Defeito Mecânico no Veículo / Saída de leito carroçável	0,014	$5,60 * 10^{-9}$
Condutor Dormindo / Colisão com objeto estático	0,028	$1,12 * 10^{-8}$
Ingestão de Álcool / Saída de leito carroçável	0,011	$4,48 * 10^{-9}$
Animais na Pista / Atropelamento de Animal	0,028	$1,12 * 10^{-8}$
Falta de Atenção do Pedestre / Atropelamento de Pedestre	0,043	$1,68 * 10^{-8}$
Defeito na Via / Saída de leito carroçável	0,019	$7,64 * 10^{-9}$

Fonte: Autor (2020)

Tabela 26 - Probabilidade das consequências

Consequências	Probabilidade das consequências (PC_i)
Impacto dos acidentes nos ocupantes	72%
Lesões aos envolvidos	50%
Danos a terceiros	18%
Prejuízos financeiros	95%

Fonte: Autor (2020)

Da mesma forma, as probabilidades de falha sob demanda das barreiras de proteção estão resumidas nas Tabelas 27 e 28. Vale salientar que essas probabilidades foram definidas de forma ilustrativa e subjetiva pelo decisor, visando caracterizar as *PFD's* das barreiras consideradas no modelo.

Tabela 27 - PFD das barreiras preventivas

Barreiras Preventivas	PFD
Fiscalização em trechos críticos	0,01
Treinamento direção defensiva	0,2
Sensor de Profundidade	0,01
Manutenção preventiva	0,2
Cercamento de rodovias	0,5
Sistema <i>Sleep Alarm</i>	0,2
Campanha de conscientização	0,5

Fonte: Autor (2020)

Para a frequência alvo do evento crítico objetivou-se, de maneira subjetiva pelo decisor, uma redução de 20% da frequência total de ocorrência dos acidentes, visando minimizar o nível de risco do cenário em estudo. Logo, tem-se que $FA = 0,8 * FT$. Sendo assim, o valor de $1,6025 * 10^{-8}$ irá representar o nível de risco tolerável para o cenário em análise.

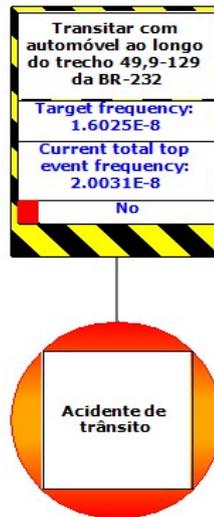
Tabela 28 - PFD das barreiras mitigativas

Barreiras Mitigativas	PFD
Uso de cinto de segurança	0,01
Airbags	0,01
Seguro de vida	0,2
Seguro a terceiros	0,2
Seguro veicular	0,2

Fonte: Autor (2020)

Ao alimentar o software *BowTieXP* com os dados de frequência e as probabilidades de falha estabelecidas, é possível notar através do resultado fornecido que os níveis de risco não estão em condições satisfatórias, pois a frequência alvo para o evento de risco é menor do que a frequência total do evento topo. Além disso, as matrizes de risco sintetizaram que existem cenários de alto risco para as consequências do modelo. Dessa forma, há necessidade de adicionar barreiras de segurança preventivas e mitigativas para controlar o risco. O resultado da análise pode ser visto por completo na Figura 11.

Figura 11 - Resultados da análise LOPA para o nível de risco



Fonte: Autor (2020)

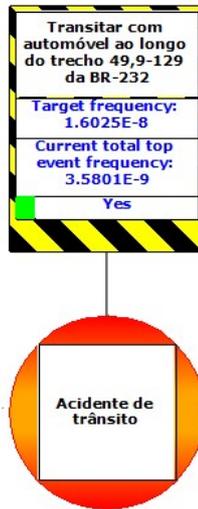
Como os resultados da matriz de risco sintetizaram que as consequências “impacto do acidente nos ocupantes” e “prejuízos financeiros” representam cenários de alto risco para o modelo, barreiras reativas podem ser adicionadas para mitigar esses danos. Uma barreira que mostra alta efetividade em retardar o impacto nos ocupantes dos veículos é o sistema de proteção contra impactos de capotagem (ROPS), que consiste em uma estrutura destinada a proteger os condutores contra ferimentos causados pelos acidentes de trânsito, especialmente em capotagens. Outra barreira efetivamente razoável para mitigar os prejuízos financeiros decorrentes dos acidentes é o investimento no sistema de saúde, onde através de um serviço de saúde qualificado pode-se reduzir os custos com as vítimas nos hospitais, visto que as mesmas poderão ter menores tempos de permanência nas unidades de saúde, a depender da gravidade da lesão sofrida.

Barreiras preventivas também devem ser adicionadas ao modelo, visto que é necessário reduzir a probabilidade de ocorrência do evento principal. Uma delas é a alocação de limitadores de velocidade em trechos críticos, que pode ter efetividade alta na prevenção de acidentes, já que a velocidade de tráfego será reduzida. Outra barreira preventiva é o incremento da sinalização horizontal e vertical, que pode ser razoavelmente efetiva para evitar novas ocorrências, visto que alertará o condutor sobre condições adversas que poderão surgir em seu trajeto. Essa barreira tem efetividade moderada devido ao fato de depender da atenção do condutor e das condições de visibilidade da pista.

Sendo assim, após as novas barreiras terem sido definidas, implementa-se as mesmas no diagrama Bow-Tie, refazendo a análise LOPA para averiguar se o nível de risco tolerável foi atendido. Os resultados da análise mostram que a frequência total do evento topo foi

reduzida, tornando-se menor que a frequência alvo e entrando dentro da margem de segurança requerida. Portanto, não há necessidade de adicionar novas barreiras ou modificar as existentes. O resultado da análise LOPA pode ser visto na Figura 12.

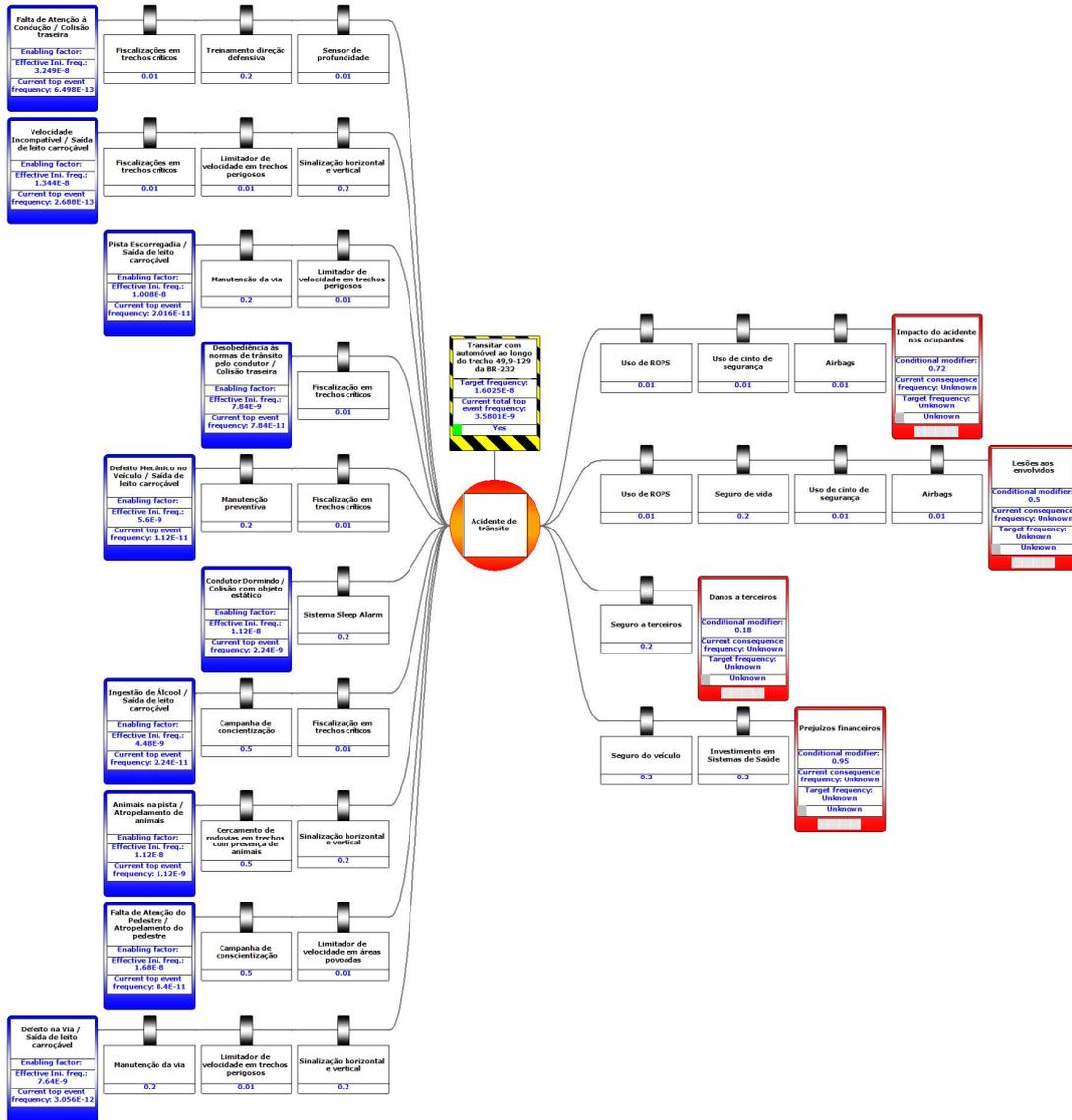
Figura 12 - Resultado da análise LOPA para o nível de risco após adição de barreiras de proteção



Fonte: Autor (2020)

Com a adição das barreiras de proteção, a nova estrutura do diagrama Bow-Tie pode ser vista na Figura 13. A estrutura também se encontra disponível no Apêndice A para visualização dos componentes do Bow-Tie de forma desagregada.

Figura 13 - Estrutura diagrama Bow-Tie



Fonte: Autor (2020)

Após definir a nova estrutura do Bow-Tie, refazemos a avaliação do risco para verificar se as consequências continuam com cenários de alto risco após a adição das barreiras de proteção. Sendo assim, a matriz de risco para o impacto do acidente nos ocupantes pode ser vista na Figura 14.

Figura 14 - Nova matriz de risco para a consequência 1

Impacto dos acidentes nos ocupantes		Impacto				
		Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
Probabilidade	Muito baixa					
	Baixa					
	Média			1 (Atual)		
	Alta					
	Muito alta			1 (Anterior)		

Fonte: Autor (2020)

Pode-se notar que a probabilidade da consequência foi reduzida com a adição das barreiras de proteção, onde o *FTC* da mesma possui o novo valor de $2,5777 * 10^{-9}$, estabelecendo um nível de probabilidade médio na matriz. Sendo assim, resulta-se em um cenário de risco moderado para a consequência em questão.

A análise para a consequência “lesões aos envolvidos” pode ser vista na Figura 15.

Figura 15 - Nova matriz de risco para a consequência 2

Lesões aos envolvidos		Impacto				
		Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
Probabilidade	Muito baixa					
	Baixa					
	Média		2 (Atual)			
	Alta		2 (Anterior)			
	Muito alta					

Fonte: Autor (2020)

É possível observar que se reduziu a probabilidade da consequência com a adição das barreiras preventivas e mitigativas, onde o *FTC* da mesma possui o novo valor de $1,7901 * 10^{-9}$, representando um cenário de baixo risco para a consequência em análise.

Partindo para a mesma análise, a nova matriz de risco para a consequência “prejuízos financeiros” pode ser visualizada na Figura 16.

Figura 16 - Nova matriz de risco para a consequência 4

Prejuízos financeiros		Impacto				
		Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
Probabilidade	Muito baixa					
	Baixa					
	Média			4 (Atual)		
	Alta					
	Muito alta				4 (Anterior)	

Fonte: Autor (2020)

Com a adição das barreiras preventivas e mitigativas reduziu-se tanto a probabilidade quanto o impacto da consequência em questão, dado que a probabilidade de ocorrência do evento crítico foi minimizada e os custos com as vítimas poderão ser amenizados com o incremento da qualidade no sistema de saúde. Dessa forma, o *FTC* da consequência possui o valor de $3,4011 * 10^{-9}$, estabelecendo um cenário de risco moderado para a mesma.

Após os resultados das matrizes de risco e análise LOPA terem sido analisados, pode-se verificar que o nível de risco é satisfatório para o fenômeno em estudo, onde é essencial controlar e gerir eficientemente os elementos de risco para que a situação não fuja do equilíbrio e novos eventos indesejados voltem a ocorrer. Para tanto, as ferramentas de gerenciamento de

risco abordadas neste trabalho podem ser úteis para monitorar e coordenar todos os riscos envolvidos no sistema.

5. CONCLUSÕES

Os acidentes de trânsito mostraram ser uma das principais causas de mortes em todo o mundo, podendo causar consequências severas para os seus envolvidos. No Brasil, o cenário não é diferente, onde há inúmeros fatores de riscos que podem desencadear na ocorrência desses incidentes. Entre eles tem-se as deficiências no pavimento e geometria das rodovias, ausência de sinalização, desrespeito às normas de trânsito, imprudência dos condutores, entre outros. Dessa forma, é de extrema relevância compreender e tratar os riscos presentes nos acidentes, haja vista que o incremento das condições seguras nas estradas é de interesse comum.

A prática de analisar os riscos de um evento perigoso é indispensável para identificar os impactos, ameaças e consequências que os riscos podem acarretar a um determinado sistema. Dado isso, o presente estudo buscou propor um framework para avaliar os riscos presentes nos acidentes de trânsito por meio das ferramentas de gestão de risco Bow-Tie, Matriz de Risco e LOPA, visto que são ferramentas fundamentais para implementar uma política de segurança, onde através da priorização de ações e medidas de seguridade pode-se prevenir e mitigar os possíveis danos que uma situação de risco pode causar.

A construção do diagrama Bow-Tie permitiu identificar os principais parâmetros envolvidos nos acidentes de trânsito do cenário em análise, onde as causas e consequências puderam ser elicitadas nas Tabelas 18 e 19. Da mesma forma, barreiras preventivas e reativas foram interligadas, respectivamente, as causas e consequências do modelo, para assim evitar e reduzir os resultados adversos causados pelos acidentes.

A princípio, os resultados das matrizes de risco e análise LOPA mostraram que o nível de risco não era satisfatório para o cenário analisado, sendo necessário adicionar novas barreiras de segurança para diminuir a frequência de ocorrência do evento topo. Para isso, quatro novas barreiras foram adicionadas, sendo duas preventivas e duas mitigativas. O resultado final foi efetivo para o alcance do cenário de risco controlado, onde os padrões de segurança admissíveis foram obtidos.

Assim, é imprescindível monitorar e controlar o risco após aplicação da metodologia proposta no framework, já que novos riscos poderão surgir ou serem alterados, além da necessidade de averiguar se as ações e medidas planejadas tiveram o resultado esperado, modificando a estratégia de acordo com o comportamento do contexto analisado na prática. Portanto, o framework mostrou-se eficiente na gestão dos riscos presentes nos acidentes de trânsito, obtendo resultados que atingiram níveis de segurança satisfatórios para o cenário analisado.

Entretanto, uma das limitações desta pesquisa é a inviabilidade de aplicação da análise de risco em trechos maiores, abrangendo novas rodovias e diferentes variáveis, uma vez que há particularidades e características distintas que precisam ser consideradas ao se analisar trechos de maior extensão, necessitando-se informações mais específicas para obtenção de resultados consistentes.

Portanto, pode-se sugerir para possíveis trabalhos futuros a aplicação da análise de risco em novos trechos, abordando diferentes rodovias críticas de Pernambuco. Além disso, novas ferramentas de gestão de risco podem ser utilizadas para melhorar a acurácia na avaliação e tratamento dos riscos.

REFERÊNCIAS

- ALVES, L. C. Uma aplicação da técnica de Análise de Camadas de Proteção (LOPA) na avaliação de risco de incêndios nas rotas de cabos de desligamento de um reator nuclear. p. 5–27, 2007.
- APÓLICE, R. *Gristec explica a importância do modal rodoviário para o Brasil*. Disponível em: <<https://www.revistaapolice.com.br/2013/03/gristec-explica-a-importancia-do-modal-rodoviario-para-o-brasil/>>. Acesso em: 9 dez. 2019.
- AUST, J.; PONS, D. Bowtie methodology for risk analysis of visual borescope inspection during aircraft engine maintenance. *Aerospace*, v. 6, n. 10, 2019.
- BIOULAC, S. *et al.* Risk of motor vehicle accidents related to sleepiness at the wheel: A systematic review and meta-analysis. *Sleep*, v. 40, n. 10, 2017.
- CHAGAS, D. M.; NODARI, C. T.; LINDAU, L. A. Lista de fatores contribuintes de acidentes de trânsito para pesquisa no Brasil. *XXVI ANPET Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*, v. 08, p. 799–810, 2011. Disponível em: <<http://redpgv.coppe.ufrj.br/index.php/es/produccion/articulos-cientificos/2012-1/689-fatores-contribuintes-acidentes-de-transito-anpet-2012/file>>.
- CNT. *Transporte Rodoviário - Desempenho do Setor, Infraestrutura e Investimentos*. Disponível em: <<https://cnt.org.br/agencia-cnt/transporte-rodoviario-desempenho-infraestrutura-investimentos>>. Acesso em: 11 dez. 2019.
- CONDEPE FIDEM. *No Title*. Disponível em: <<http://www.condepefidem.pe.gov.br/web/condepe-fidem/municipal>>.
- DE ALMEIDA, R. L. F. *et al.* Man, road and vehicle: Risk factors associated with the severity of traffic accidents. *Revista de Saude Publica*, v. 47, n. 4, p. 1–13, 2013.
- DE RUIJTER, A.; GULDENMUND, F. The bowtie method: A review. *Safety Science*, v. 88, p. 211–218, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2016.03.001>>.
- DEB, R.; LIEW, A. W. Missing value imputation for the analysis of incomplete traffic accident data. *Information Sciences*, v. 339, p. 274–289, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2016.01.018>>.
- DEDIANOUS, V. *et al.* ARAMIS project: A more explicit demonstration of risk control through the use of bow-tie diagrams and the evaluation of safety barrier performance. *Journal of Hazardous Materials*, v. 130, n. 3, p. 220–233, mar. 2006.
- DELVOSALLE, C. *et al.* ARAMIS project: a comprehensive methodology for the identification of reference accident scenarios in process industries. *Journal of hazardous materials*, v. 130, n. 3, p. 200–219, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.005>>.
- DENATRAN. *Estatísticas - Frota de Veículos - DENATRAN*. Disponível em: <<https://infraestrutura.gov.br/component/content/article/115-portal-denatran/8552-estatisticas-frota-de-veiculos-denatran.html>>. Acesso em: 20 dez. 2019.
- DOANE, D. P.; SEWARD, L. E. *Estatística aplicada à administração e economia*. 4. ed. [S.l.]: AMGH Editora Ltda., 2014.
- DOMÍNGUEZ, C. R. *et al.* Analysis and evaluation of risks in underground mining using the decision matrix risk-assessment (DMRA) technique, in Guanajuato, Mexico. *Journal of Sustainable Mining*, v. 18, n. 1, p. 52–59, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.01.001>>.
- DUIJM, N. J. Safety-barrier diagrams as a safety management tool. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 94, n. 2, p. 332–341, 2009.
- EBOLI, L.; MAZZULLA, G. A behavioural model to estimate willingness-to-pay for reducing road accident risk. *Advances in Transportation Studies*, 1 jan. 2008.
- EHLERS, U. C. *et al.* Assessing the safety effects of cooperative intelligent transport systems: A bowtie analysis approach. *Accident Analysis and Prevention*, v. 99, p. 125–141, 2017.

Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2016.11.014>>.

ESTRAT, S. Saiba mais sobre a metodologia Bowtie ou O que é a metodologia Bowtie ? Como implementar a metodologia Bowtie na empresa ? p. 1–4, 2020.

FERDOUS, R. *et al.* Analyzing system safety and risks under uncertainty using a bow-tie diagram: An innovative approach. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 91, n. 1–2, p. 1–18, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2011.08.010>>.

FILHO, M. M. Acidentes de trânsito: as consequências visíveis e invisíveis à saúde da população. *Revista Espaço Acadêmico*, v. 11, n. 128, p. 148–157, 2011.

GOWLAND, R. The accidental risk assessment methodology for industries (ARAMIS)/layer of protection analysis (LOPA) methodology: A step forward towards convergent practices in risk assessment? *Journal of Hazardous Materials*, v. 130, n. 3 SPEC. ISS., p. 307–310, 2006.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Estimativa dos Custos dos Acidentes de Trânsito no Brasil com Base na Atualização Simplificada das Pesquisas Anteriores do Ipea. *Relatório de Pesquisa do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada*, p. 20, 2015.

Disponível em: <http://www.en.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/160516_relatorio_estimativas.pdf>.

ISO. ISO 31000 Risk management - Principles and guidelines. *International Organization for Standardization*, p. 34, 2018.

JIN, J. *et al.* Theoretical basis of quantification for layer of protection analysis (LOPA). *Annals of Nuclear Energy*, v. 87, n. P2, p. 69–73, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2015.08.016>>.

KASSU, A.; ANDERSON, M. Analysis of severe and non-severe traffic crashes on wet and dry highways. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, v. 2, p. 100043, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.trip.2019.100043>>.

KHAKZAD, N.; KHAN, F.; AMYOTTE, P. Dynamic risk analysis using bow-tie approach. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 104, p. 36–44, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2012.04.003>>.

KHALIL, M. *et al.* A cascaded fuzzy-LOPA risk assessment model applied in natural gas industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 25, n. 6, p. 877–882, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2012.04.010>>.

LERNER, J. *Governo do estado do paran .*

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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2011.03.004>>.

MARTINS, M. R.; NATACCI, F. B. Metodologia Para Análise Preliminar De Riscos De Um Navio De Transporte De Gás Natural Comprimido. n. November, p. 15, 2009. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/266602791>>.

MELLO JORGE, M. H. P. DE; LATORRE, M. R. D. O. Acidentes de trânsito no Brasil: dados e tendências. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 10, n. suppl 1, p. S19–S44, 1994.

MOKHTARI, K. *et al.* Application of a generic bow-tie based risk analysis framework on risk management of sea ports and offshore terminals. *Journal of Hazardous Materials*, v. 192, n. 2, p. 465–475, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.05.035>>.

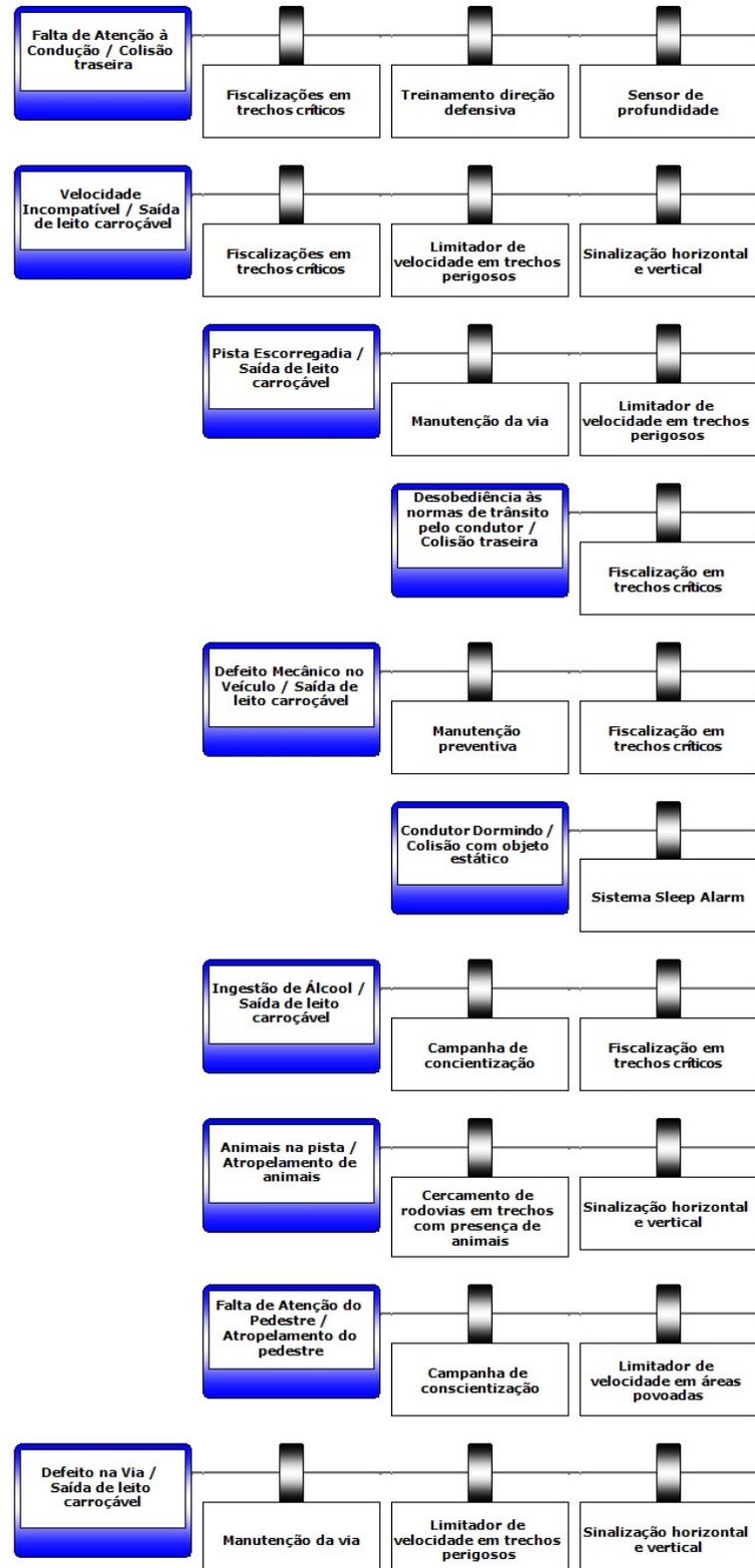
MORAIS NETO, O. L. DE *et al.* Projeto Vida no Trânsito: avalia o das a o es em cinco capitais brasileiras, 2011-2012. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, v. 22, n. 3, p. 373–382, 2013.

MULCAHY, M. B. *et al.* Using bowtie methodology to support laboratory hazard identification, risk management, and incident analysis. *Journal of Chemical Health and Safety*,

- v. 24, n. 3, p. 14–20, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jchas.2016.10.003>>.
- NAPOLEÃO, B. M. *Matriz De Probabilidade E Impacto*.
- OWUSU, C. K. *et al.* Identification of Road Traffic Accident Hotspots in the Cape Coast Metropolis, Southern Ghana Using Geographic Information System (GIS). *International Journal of Scientific & Engineering Research*, v. 9, n. 10, p. 2106, 2018.
- PAPADIMITRIOU, E. *et al.* Review and ranking of crash risk factors related to the road infrastructure. *Accident Analysis & Prevention*, v. 125, n. February 2018, p. 85–97, abr. 2019.
- PASMAN, H.; ROGERS, W. Bayesian networks make LOPA more effective, QRA more transparent and flexible, and thus safety more definable! *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 26, n. 3, p. 434–442, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2012.07.016>>.
- POLÍCIA RODOVIÁRIA FEDERAL. *Dados Abertos - Acidentes*. Disponível em: <<https://portal.prf.gov.br/dados-abertos-acidentes>>. Acesso em: 10 dez. 2019.
- RAMÍREZ-MARENGO, C. *et al.* A formulation to optimize the risk reduction process based on LOPA. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 26, n. 3, p. 489–494, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2012.07.009>>.
- REIS, E. A.; REIS, I. A. *Análise Descritiva de Dados*. 2002.
- REIS, M. M. *Estatística Aplicada à Administração*. [S.l: s.n.], 2009.
- RISK, C. G. E. *et al.* The optimal process of risk management according to ISO 31000 Risk identification. n. October, p. 1–7, 2009.
- SAMPAIO, N. A. DE S.; ASSUMPÇÃO, A. R. P. DE; FONSECA, B. B. DA. *Estatística Descritiva*. *Estatística Descritiva*, p. 1–49, 2018.
- SHAHRIAR, A.; SADIQ, R.; TESHAMARIAM, S. Risk analysis for oil & gas pipelines: A sustainability assessment approach using fuzzy based bow-tie analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 25, n. 3, p. 505–523, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2011.12.007>>.
- SRIVASTAVA, A.; THOMSON, S. B. Framework Analysis : Research Note. *Journal of Administration & Governance*, v. 4, n. 2, p. 72–79, 2009.
- TRIOLA, M. F. Maio '. 1999.
- WEBER, M. Some Safety Aspects on the Design of Sparger Systems for the. *Process Safety Progress*, v. 25, n. 4, p. 326–330, 2006.
- WELLE, B. *et al.* SUSTENTÁVEL E SEGURO: Visão e Diretrizes para Zerar as Mortes no Trânsito. *World Resources Institute*, v. 76, 2018.
- WHO. *Global status report on road safety 2018*. . Geneva: World Health Organization (CC BY- NC-SA 3.0 IGO), ago. 2018.
- WISNIOWSKI, W.; LUKASIK, B. Full-Electric , Hybrid and Turbo-Electric Technologies. *Journal of KONES*, v. 23, n. 4, p. 1–6, 2016. Disponível em: <<http://doi.org/10.5604/12314005.1217240>>.
- XIN, J.; HUANG, C. Fire risk analysis of residential buildings based on scenario clusters and its application in fire risk management. *Fire Safety Journal*, v. 62, n. PART A, p. 72–78, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.09.022>>.
- XU, Q. *et al.* Safety assessment of petrochemical enterprise using the cloud model, PHA-LOPA and the bow-tie model. *Royal Society Open Science*, v. 5, n. 7, 2018.
- YAZDI, M. The Application of Bow-Tie Method in Hydrogen Sulfide Risk Management Using Layer of Protection Analysis (LOPA). *Journal of Failure Analysis and Prevention*, v. 17, n. 2, p. 291–303, 2017.
- YUN, G. W.; ROGERS, W. J.; MANNAN, M. S. Risk assessment of LNG importation terminals using the Bayesian-LOPA methodology. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 22, n. 1, p. 91–96, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2008.10.001>>.

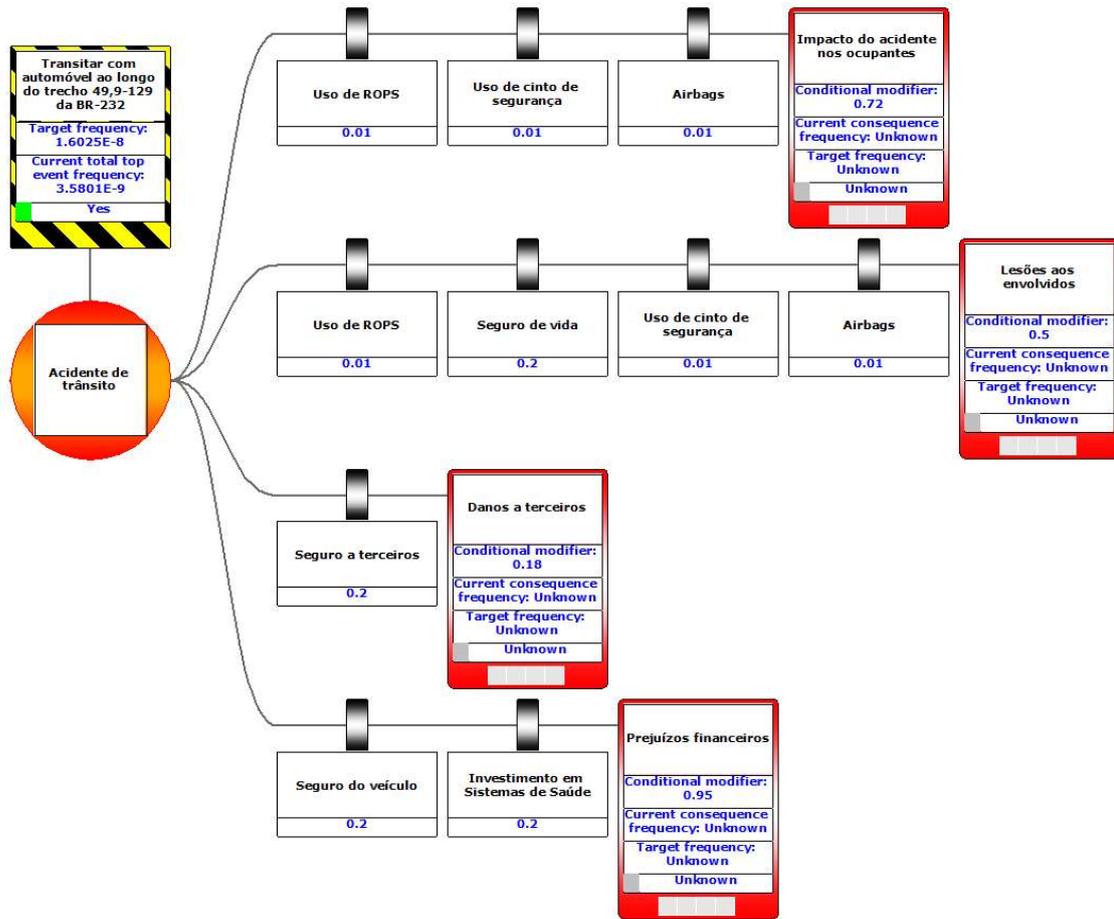
APÊNDICE A – ESTRUTURA DESAGREGADA DO DIAGRAMA BOW-TIE

Figura 17 - Ameaças do diagrama Bow-Tie



Fonte: Autor (2020)

Figura 18 - Evento principal e consequências do diagrama Bow-Tie



Fonte: Autor (2020)