MARCO AURÉLIO PESTANA

Elicitação de especialistas em estudos de confiabilidade e análise de risco

São Paulo

2017

MARCO AURÉLIO PESTANA

Elicitação de especialistas em estudos de confiabilidade e análise de risco

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Ramos Martins

São Paulo

2017

MARCO AURÉLIO PESTANA

Elicitação de especialistas em estudos de confiabilidade e análise de risco

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Engenharia Naval e
Oceânica

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Ramos Martins

São Paulo

2017

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Pestana, Marco Aurélio

Elicitação de especialistas em estudos de confiabilidade e análise de risco / M. A. Pestana -- versão corr. -- São Paulo, 2017.
151 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1. Julgamento de opiniões de especialistas 2. Elicitação de especialistas
3. Probabilidade subjetiva na ciência I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II. t.

Dedico este trabalho aos meus pais, Nelson e Shirley e a minha noiva, Marlene.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me oferecer este desafio.

Agradeço aos meus pais por terem me incentivado a estudar, estando sempre ao meu lado, mesmo nos momentos de dificuldade.

Agradeço a minha noiva Marlene que acreditou em mim e me incentivou do início ao fim deste trabalho, insistindo com veemência o prosseguimento desta trajetória.

Agradeço ao querido e amigo, Prof. Dr. Marcelo Ramos Martins, que atuou como meu orientador elucidando minhas dúvidas de forma precisa e serena. Minha gratidão será eterna.

Agradeço à Marinha do Brasil pela bolsa concedida, auxílio que facilitou a execução deste trabalho.

Agradeço aos Profs. Drs. Gilberto Francisco Martha de Souza e Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo que ministraram as aulas do departamento de Pós-Graduação com extrema competência, contribuindo para uma avaliação crítica de meu conhecimento.

Agradeço aos amigos do laboratório de análise, avaliação e gerenciamento de risco (LabRisco) que se dispuseram a sanar as dúvidas nos momentos de dificuldade, considerando em especial o amigo Marcos Shoiti que disponibilizou e autorizou o uso dos dados de seu trabalho de pesquisa nesta dissertação.

Por fim agradeço a todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a execução deste trabalho.

“We don’t know who are the best experts. Sometimes the people with the most detailed knowledge are not the best at quantifying their uncertainty.”
(Cooke & Goossens)

RESUMO

O propósito desta dissertação é apresentar o uso da opinião de especialistas e outras questões relevantes acerca do assunto na avaliação das incertezas em estudos de análise de risco e confiabilidade, com apresentação de um estudo de caso prático. Em estudos de confiabilidade uma das principais preocupações está na determinação das frequências de ocorrência dos eventos e seu comportamento ao longo do tempo. Muitas vezes, os dados de frequência estão obsoletos, não estão disponíveis ou mesmo, não são suficientes para se avaliar a probabilidade de ocorrência de eventos. Uma exemplificação, que será apresentada neste trabalho, esta relacionada avaliação das probabilidades de eventos na Hidrovia Tietê-Paraná. Neste estudo de caso, existe uma preocupação com a elevação do número de acidentes em virtude do aumento do número de comboios. Estimar as probabilidades de eventos potenciais baseado no histórico de acidentes pode não ser conveniente e, nestes casos, a elicitación de especialistas surge como uma alternativa a suplementar esta ausência de dados possibilitando assim, uma melhor análise das incertezas. Baseado na condição da subjetividade, a elicitación de especialistas tem como objetivo quantificar as incertezas a partir da experiência prévia e estado atual de conhecimento. Combinado com métodos matemáticos, a elicitación possibilita o gerenciamento de conflitos de informações de forma a atingir o consenso e possibilitar uma análise subjetiva dos problemas.

Palavras-chave: Julgamento de opiniões de especialistas, Elicitación de especialistas, Probabilidade subjetiva na ciência.

ABSTRACT

The purpose of this dissertation is to present the use of expert opinion and other relevant issues on the subjective assessment of uncertainties in risk analysis and reliability studies, presenting a practical case study. In reliability studies a major concern is to determine the frequencies of occurrence of events and their behavior through time. Often, the available data are not representative enough to evaluate the event probability or it is obsolete for use. In these cases, the elicitation of expert opinion is an alternative to supplement these lack of data, thus enabling a better uncertainties analysis. An example, which will be presented in this work, is related evaluation of the probabilities of events in the Tietê-Paraná Waterway. In this case study, there is concern about the increase in the number of accidents due to the increase in the number of barges and tugboats. Estimating the probability of potential events based on the history of accidents may not be convenient and in this cases, the elicitation of expert opinion appears as an alternative to supplement this data absences, thus allowing a better analysis of the uncertainties. Based on the subjectivity condition, the elicitation of expert opinion aims to quantify the uncertainty considering the previous experiences and current state of knowledge. Combined with mathematical methods, elicitation enable the management of information conflicts in order to reach consensus and makes it possible a subjective analysis of problems.

Keywords: Expert Judgment, Expert Elicitation, Subjective Probability in Science.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Hierarquia entre dados, informações e conhecimento	5
Figura 1.2 – Conhecimento do ser humano	6
Figura 2.1 – Árvore de eventos do sistema de segurança do reator nuclear	18
Figura 2.2 – Árvore de decisão do caso Texaco-Pennzoil	20
Figura 2.3 – Árvore de decisão Texaco-Pennzoil após o cálculo do valor esperado dos tribunais.....	21
Figura 2.4 – Simplificação da árvore de decisão Texaco-Pennzoil	22
Figura 2.5 – Árvore de decisão após solução de todos os nós	22
Figura 2.6 – Igualdade para determinação dos intervalos bayesianos	27
Figura 2.7 – Intervalos bayesianos de acordo com as preferências do especialista.....	28
Figura 2.8 – Distribuição de probabilidades subjacente às incertezas do especialista	29
Figura 2.9 – Estruturação da rede hierárquica no AHP	30
Figura 2.10 – Matriz de comparação dos pesos dos especialistas	31
Figura 2.11 – Peso dos especialistas obtido a partir da potência da matriz de comparativa	32
Figura 2.12 – Peso dos especialistas obtidos pela normalização da matriz comparativa	33
Figura 2.13 – Alguns pares de refletores avaliados pelos especialistas.....	35
Figura 4.1 – Representação clássica (a) e difusa (b) dos homens altos	60
Figura 4.2 – Função pertinência da opinião de um especialista	62
Figura 4.3 – Representação da similaridade entre dois especialistas.....	63
Figura 4.4 – Representação da ausência de similaridade entre dois especialistas	63
Figura 4.5 – Matriz de similaridade	64
Figura 5.1 – Interpretação do Teorema de Bayes	71
Figura 5.2 – Taxas de falha de unidades de bombeamento incluindo motor.....	74
Figura 5.3 – Histograma da probabilidade de falha priori e posteriori dos geradores a diesel.	78
Figura 6.1 – Elicitação de especialistas: problemas discutidos	86
Figura 6.2 – Representação gráfica dos números difusos.....	92
Figura 6.3 – Influência do fator de relaxamento na probabilidade de ocorrência de mortes ou invalidez permanente	100
Figura 6.4 – Probabilidades de ocorrência de uma fatalidade	109
Figura 6.5 – Probabilidades de ocorrência de duas fatalidades	110
Figura 6.6 – Probabilidades de ocorrência de três fatalidades.....	110

Figura 6.7 – Probabilidades de ocorrência obtidas a partir dos dados históricos e das opiniões dos especialistas	111
--	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Alternativas, valores esperados, consequências e probabilidades para o caso Texaco-Pennzoil	23
Tabela 2.2 – Intervalos, subintervalos e preferências do especialista.....	27
Tabela 2.3 – Escala fundamental de Saaty.....	31
Tabela 2.4 – Valores do índice aleatório	34
Tabela 2.5 – Detalhamento dos valores obtidos cálculo na verificação da consistência dos pesos dos especialistas	34
Tabela 2.6 – Resultados obtidos na elicitación de especialistas na seleção dos melhores refletores de segurança.....	36
Tabela 3.1 – Concordância em função do coeficiente de Kendall.....	44
Tabela 3.2 – Classificação das causas de acidentes hidroviários segundo os especialistas.....	44
Tabela 3.3 – Especialista com incerteza entre o melhor e o pior cenários	46
Tabela 3.4 – Especialista E6 com incerteza no pior cenário.....	46
Tabela 3.5 – Especialista com incerteza no cenário menos crítico.....	47
Tabela 3.6 – Especialista com incerteza nos cenários intermediários	47
Tabela 4.1 – Principais heurísticas de comportamento.....	51
Tabela 4.2 – Custo de manutenção segundo opinião dos especialistas	55
Tabela 4.3 – Opiniões dos especialistas agrupadas em classes	56
Tabela 5.1 – Teorema de Bayes: falha durante a partida.....	77
Tabela 6.1 – Resumo da qualificação e experiência dos especialistas em anos	85
Tabela 6.2 – Pontuação adquirida pelo especialista em função da sua categoria de atuação ..	88
Tabela 6.3 – Pontuação adquirida pelo especialista em relação à sua função	89
Tabela 6.4 – Critério de pontuação dos especialistas em relação ao tempo de experiência (dado em anos)	89
Tabela 6.5 – Pontuação e peso obtidos pelos especialistas em função da qualificação e do tempo experiência	90
Tabela 6.6 – Classificação dos especialistas em relação à credibilidade.....	90
Tabela 6.7 – Escala de conversão dos termos linguísticos em conjuntos difusos	91
Tabela 6.8 – Opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de mortes ou invalidez permanente do indivíduo, decorrente de um acidente na HTP	93

Tabela 6.9 – Opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de lesões ao indivíduo decorrente de um acidente na HTP	93
Tabela 6.10 – Opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de danos em embarcações decorrente de um acidente na HTP	94
Tabela 6.11 – Opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de danos em obras civis e outros decorrente de um acidente na HTP	95
Tabela 6.12 – Opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de danos ambientais decorrente de um acidente na HTP	95
Tabela 6.13 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de mortes ou invalidez permanente decorrente de um acidente na HTP	97
Tabela 6.14 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de mortes ou invalidez permanente decorrente de um acidente na HTP	98
Tabela 6.15 – Resumo dos resultados obtidos na avaliação das possibilidades de ocorrência das consequências	100
Tabela 6.16 – Opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência dos tipos de acidentes	101
Tabela 6.17 – Pesos dos especialistas após normalização	102
Tabela 6.18 – Resumo dos resultados obtidos na avaliação das possibilidades de ocorrência dos tipos de acidentes	103
Tabela 6.19 – Avaliação dos especialistas em relação às possibilidades dos fatores humanos, materiais e operacionais contribuírem para a ocorrência de um acidente hidroviário	103
Tabela 6.20 – Resumo dos resultados obtidos na avaliação das possibilidades dos fatores humano, material ou operacional contribuírem na ocorrência de um acidente hidroviário	104
Tabela 6.21 – Número de fatalidades e feridos em acidentes hidroviários.	105
Tabela 6.22 – Estimativa das taxas de ocorrências dos eventos a partir dos dados históricos.	107
Tabela 6.23 – Comparativo entre probabilidade de ocorrência de mortes na HTP a partir dos dados históricos e da opinião de especialistas	108
Tabela 6.24 – Comparativo entre probabilidade de ocorrência de eventos na HTP a partir dos dados históricos e das opiniões de especialistas	112

Tabela 7.2 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de danos em embarcações decorrente de um acidente na HTP.	122
Tabela 7.3 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de danos em obras civis e outros decorrente de um acidente na HTP	123
Tabela 7.4 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de danos ambientais decorrente de um acidente na HTP	123
Tabela 7.5 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo naufrágio na HTP	124
Tabela 7.6 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo encalhe na HTP	124
Tabela 7.7 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo colisão na HTP	125
Tabela 7.8 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo abalroação na HTP	125
Tabela 7.9 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo água aberta na HTP	126
Tabela 7.10 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de uma explosão decorrente de um acidente na HTP	126
Tabela 7.11 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um incêndio decorrente de um acidente na HTP	127
Tabela 7.12 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo variação na HTP	127
Tabela 7.13 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo arribada na HTP	128
Tabela 7.14 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo alijamento na HTP	128
Tabela 7.15 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo avaria/defeito na HTP.....	129
Tabela 7.16 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade dos fatores humanos contribuírem na ocorrência de um acidente na HTP	129
Tabela 7.17 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade dos fatores materiais contribuírem na ocorrência de um acidente na HTP	130
Tabela 7.18 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade dos fatores operacionais contribuírem na ocorrência de um acidente na HTP	130

Tabela 7.19 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de lesões ao indivíduo decorrente de um acidente na HTP	131
Tabela 7.20 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de danos em embarcações decorrente de um acidente na HTP	131
Tabela 7.21 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de danos em obras civis e outros decorrente de um acidente na HTP	131
Tabela 7.22 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de danos ambientais decorrente de um acidente na HTP	131
Tabela 7.23 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade da ocorrência de um acidente do tipo naufrágio na HTP	131
Tabela 7.24 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade da ocorrência de um acidente do tipo encalhe na HTP	132
Tabela 7.25 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo colisão na HTP	132
Tabela 7.26 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade da ocorrência de um acidente do tipo abalroação na HTP	132
Tabela 7.27 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade da ocorrência de um acidente do tipo água aberta na HTP	132
Tabela 7.28 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de uma explosão decorrente de um acidente na HTP	132
Tabela 7.29 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um incêndio decorrente de um acidente na HTP	132

Tabela 7.30 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade da ocorrência de um acidente do tipo variação na HTP	133
Tabela 7.31 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade da ocorrência de um acidente do tipo arribada na HTP	133
Tabela 7.32 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade da ocorrência de um acidente do tipo alijamento na HTP	133
Tabela 7.33 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade da ocorrência um acidente do tipo avaria/defeito na HTP	133
Tabela 7.34 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade dos fatores humanos contribuírem na ocorrência de um acidente na HTP	133
Tabela 7.35 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade dos fatores materiais contribuírem na ocorrência de um acidente na HTP	133
Tabela 7.36 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade dos fatores operacionais contribuírem na ocorrência de um acidente na HTP	134

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Average Agreement Degree
AHP	Analytical Hierarchy Process
ANSI	American National Standards Institute
APS	Análise Probabilística de Segurança
CFL	Capitão Fluvial
CMF	Contramestre Fluvial
CMT	Comandantes
COA	Center of Area (Centro da Área)
CC	Consensus Coefficient (Coeficiente de Consenso)
C.R.	Consistency Ratio (Taxa de Consistência)
C.I.	Consistency Index (Índice de Consistência)
CFP	Crisp Failure Possibility (Possibilidade de falha crisp)
FSA	Formal Safety Assessment (Avaliação Formal de Segurança)
FP	Failure Probability (Probabilidade de Falha)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto dos Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
EIK	Evolutionary Infallible Knowledge
IK	Knowledge Infallible with Propositions
IMO	International Maritime Organization (Organização Marítima Internacional)
IMT	Imediatos
MFL	Mestre Fluvial
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NGT	Nominal Group Technique (Técnica Nominal de Grupo)
PFL	Piloto Fluvial
PWR	Pressurized Water Reactor (Reator de Água Pressurizada)
BWR	Boiling Water Reactor (Reator de Água Fervente)
RAND	Research and Development (Pesquisa e Desenvolvimento)
R.I.	Random Consistency Index (Índice de Consistência Aleatório)
RK	Reliability Knowledge
RSS	Reactor Safety Study – WASH 1400 (Estudo de Segurança do Reator)
SRA	Society for Risk Analysis (Sociedade de Análise de Risco)

SRB	Solid Rocket Booster (Propulsor de Combustível Sólido)
SAM	Similarity Aggregation Method (Método de Agregação por Similaridade)
SM	Similarity Matrix (Matriz Similaridade)
USAEC	United States Army Environmental Command
U.S. NRC	United States Nuclear Regulatory Commission (Comissão Reguladora Nuclear dos Estados Unidos)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONCEITOS PRELIMINARES	3
1.1.1. Interpretação clássica, frequencista e subjetiva da probabilidade	3
1.1.2. Dados, informações, conhecimento e inteligência	4
1.1.3. Métodos e Técnicas de elicitação	7
1.2. OBJETIVO DO TRABALHO	9
1.3. JUSTIFICATIVA PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	9
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	10
2. MÉTODOS E TÉCNICAS PARA A ELICITAÇÃO DE ESPECIALISTAS	12
2.1 MÉTODOS E TÉCNICAS DE ELICITAÇÃO DIRETA	12
2.1.1. Método Delphi	12
2.1.1.1. Características do método	14
2.1.2. Técnica Nominal de Grupo	15
2.1.3. Análise de Cenários	17
2.2. MÉTODOS E TÉCNICAS DE ELICITAÇÃO INDIRETA	23
2.2.1. Betting rates (Taxas de Apostas)	24
2.2.2. Método de Firmino e Droguett	25
2.3. COMPARAÇÃO AOS PARES	29
2.3.1. Processo Analítico Hierárquico	29
2.3.2. Uma exemplificação da comparação aos pares	34
2.4. ESTIMATIVAS PARAMÉTRICAS	36
3. ALINHAMENTO ENTRE OS ESPECIALISTAS	41
3.1. TESTE ESTATÍSTICO W	42
4. AGREGAÇÃO, COMBINAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE OPINIÕES	49
4.1. CALIBRAÇÃO DE ESPECIALISTAS	50
4.2. COMBINAÇÃO DAS OPINIÕES DE ESPECIALISTAS	52
4.2.1. Combinação matemática – médias ponderadas valores extremos	52
4.2.2. Combinação matemática – percentis, decis, quartis e mediana.	54
4.2.3. Método baseado no consenso	57
4.3. AGREGAÇÃO DE OPINIÕES DIFUSAS	58
4.3.1. Incerteza e imprecisão	58

4.3.2. Lógica clássica, lógica difusa, teoria das probabilidades e teoria das possibilidades	59
4.3.3. Agregação de opiniões difusas a partir do método de agregação por similaridade (Similarity Aggregation Method SAM)	62
5. MODELO BAYESIANO APLICADO À ELICITAÇÃO DE ESPECIALISTAS.....	70
5.1. O TEOREMA DE BAYES.....	70
5.2. APLICAÇÃO DO TEOREMA DE BAYES NA ATUALIZAÇÃO DE DADOS	73
5.3. APLICAÇÃO DO TEOREMA DE BAYES NA CALIBRAÇÃO DE ESPECIALISTAS.....	78
6. ESTUDO DE CASO.....	82
6.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA, ELABORAÇÃO DO QUESTIONÁRIO E SELEÇÃO DOS ESPECIALISTAS.....	83
6.2. AVALIAÇÃO E CALIBRAÇÃO DOS ESPECIALISTAS	87
6.3. AVALIAÇÃO DAS POSSIBILIDADES DAS CONSEQUÊNCIAS	91
6.3.1. Agregação das opiniões e resultados obtidos	98
6.4. AVALIAÇÃO DAS POSSIBILIDADES DE ACIDENTES	100
6.5. AVALIAÇÃO DOS FATORES CONTRIBUINTES	103
6.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	104
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	113
7.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	115
REFERÊNCIAS	117
APÊNDICE A – SIMILARIDADE ENTRE OS ESPECIALISTAS	122
APÊNDICE B – SIMILARIDADE MÉDIA, SIMILARIDADE RELATIVA E COEFICIENTE DE CONSENSO	131

1. INTRODUÇÃO

De origem inglesa o termo *elicitation* ainda não possui um correspondente na língua oficial do Brasil, mas pode-se entender como sendo a aquisição de opiniões sobre um determinado assunto a partir de um interrogatório. O termo apresenta uma certa similaridade com o verbo “eduzir”, mas não pode ser confundido já que este apresenta um significado mais amplo de dedução ou extração, podendo ser aplicado em uma relação de causa-efeito. Em análise de risco e estudos de confiabilidade é bastante comum ver o termo de forma agregada, na forma *expert elicitation* referindo-se ao processo de aquisição de opiniões a partir do conhecimento e experiência de especialistas. Adquirir uma opinião não significa necessariamente realizar somente a aquisição de dados, mas engloba também a aquisição de informações e ou previsões a partir do conhecimento de especialistas, assunto a ser abordado nesta dissertação. Especialista ou *expert*, de acordo com dicionário MICHAELIS, é o indivíduo que se dedica exclusivamente, ou com especial cuidado a certo estudo ou ramo de sua profissão (WEISZFLOG, 2004). Ayyub e Klir, (2006, p.298), definem especialista como um indivíduo que apresenta muitas habilidades, treinamento e conhecimento suficiente sobre um determinado assunto. Modarres; Kaminskiy e Krivtsov (1999, p.353), citam o especialista como um ser humano dotado de experiência substancial e com a capacidade de traduzi-la em termos de probabilidade. Para este trabalho, será considerado especialista um indivíduo hábil e capaz de opinar a respeito de um determinado assunto baseado no seu conhecimento e experiência prévia. O assunto poderá englobar questões relacionadas a determinação de probabilidades em termos numéricos, possibilidades em termos linguísticos, preferências em um grupo de opções ou mesmo, a estimativa de eventos futuros. Também será utilizado o termo *elicitation* como “elicitación” referindo-se ao processo de aquisição de informações.

Normalmente as opiniões de especialistas estão distribuídas no cotidiano das pessoas. Por exemplo, em assuntos econômicos, políticos, jurídicos, médicos, estudos climatológicos, entre outros, é bastante comum presenciar opiniões baseadas no conhecimento e subjetividade do especialista. Entretanto, o uso da opinião de especialista não se limita a estes campos, estendendo-se às áreas tecnológicas, onde a tomada de decisões está sempre associada ao custo financeiro que pode estar relacionado tanto aos lucros quanto a possíveis perdas, sejam elas humanas, financeiras ou mesmo ambientais. Em alguns estudos de análise de risco, por exemplo, é comum encontrar aplicações que envolvem a elicitación dos especialistas. Em geral, estas aplicações carecem de dados de probabilidade que são superados através da

aquisição dos dados pelos especialistas. A área nuclear é uma das áreas que faz uso contínuo deste recurso dada a não representatividade dos dados de falhas em determinadas aplicações (APOSTOLAKIS, 1982; PINTO, 2014). Apostolakis (1982) mostra a dificuldade da determinação de frequências de falha em componentes e equipamentos aplicados às instalações nucleares e faz uso da elicitación de especialistas para o ajuste dos dados. Apostolakis (1982) cita também o uso da opinião de especialistas na elaboração da coletânea de dados de falhas IEEE Std-500 pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). Outras diversas aplicações podem citadas na área (COOKE, 1991; HSI; CHEN, 1996; RENJITH et al., 2010; PINTO, 2014; EMRE et al., 2015), onde uma das características é a ausência de dados para a análise do comportamento de falhas de um determinado equipamento. Entretanto, não se pode marginalizar o uso da opinião de especialistas somente nestes casos, pois a opinião de especialistas pode atuar também na atualização de frequências de falhas como descrito por Apostolakis et al. (1980).

A elicitación de especialistas deve ser conduzida de forma rigorosa para não originar conclusões equivocadas. Cooke (1991, p.19), por exemplo, mostra a abordagem inadequada da opinião de especialistas resultando em um grave acidente durante o lançamento do ônibus espacial Challenger em 1986. Em 1983, o resumo elaborado por E.W. Colglazier e R.K. Weatherwax, a ser publicado na conferência da *Society for Risk Analysis (SRA)* de 1986, apontava uma revisão da probabilidade de um propulsor tipo *SRB (Solid Rocket Booster)* falhar e provocar um acidente potencial com capacidade para destruir um ônibus espacial. Baseado na atualização bayesiana, os autores inferem uma probabilidade de falhas catastróficas durante o lançamento de 1 em 35. Os valores apontados pelos autores contrariam a estimativa de 1 em 100.000 falhas catastróficas propostas pelos engenheiros especialistas da *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*. O relatório do acidente apontou que haviam divergências entre os especialistas onde o valor da probabilidade de ocorrência do evento estaria compreendida entre os valores de 10^{-2} e 10^{-5} (UNITED STATES GOVERNMENT, 1986). Em meio a estas incertezas, a NASA optou por considerar o maior valor de probabilidade em virtude do elevado nível tecnológico empregado no equipamento. Durante o vigésimo quinto lançamento do ônibus espacial Challenger, ocorrido em 28 de janeiro de 1986, o ônibus espacial explodiu durante a fase de lançamento e ocasionou a morte dos 7 tripulantes (UNITED STATES GOVERNMENT, 1986), contrariando as estimativas impostas pelos especialistas da NASA.

1.1. CONCEITOS PRELIMINARES

Esta seção aborda alguns conceitos preliminares necessários para o entendimento e proposição do trabalho a ser desenvolvido além da identificação da base de conhecimento que deverá ser explorada. Na Seção 1.1.1 serão discutidas algumas interpretações da probabilidade e onde a opinião de especialistas está inserida. A partir deste ponto, na Seção 1.1.2 serão abordadas as definições de dados, informações e conhecimento. Por fim, a Seção 1.1.3 apresentará o histórico dos métodos e técnicas de elicitação, conceituando alguns termos como técnicas ou métodos.

1.1.1. Interpretação clássica, frequentista e subjetiva da probabilidade

Existem três grandes interpretações da probabilidade: a clássica, a frequentista e a subjetiva (MODARRES; KAMINSKIY; KRIVTSOV, 1999). A interpretação clássica considera que todos os elementos presentes no espaço amostral S são igualmente prováveis e que, portanto, a probabilidade de ocorrência de um evento E pode ser obtida a partir da Eq. (1.1).

$$PR(E) = \frac{m(E)}{m(S)} \quad (1.1)$$

onde,

$m(E)$ Número de ocorrências do evento E

$m(S)$ Número de elementos do espaço amostral

Exemplificando, isto significa que se for realizada uma avaliação de funcionamento conjunto de 10 bombas idênticas de um mesmo fabricante, seria possível afirmar que todas apresentariam a mesma probabilidade de falha e esta poderia ser calculada a partir da falha de uma única bomba. Em termos práticos, esta condição seria impossível, dada a variabilidade embutida nos processos de fabricação e materiais empregados.

Na interpretação frequentista ou frequentista considera-se que existe um número infinito de elementos “ N ” não observáveis e a probabilidade de ocorrência de um evento “ E ” é determinada a partir da frequência de ocorrência dos eventos observados. Em termos

matemáticos, a probabilidade de ocorrência de um evento E pode ser calculada a partir da Eq. (1.2).

$$PR(E) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{N} \quad (1.2)$$

onde,

n Número de observações do evento E

N Número de tentativas ou total de observações

Pode-se observar que, diferentemente da interpretação clássica, a interpretação frequencista considera o histórico de falhas da bomba. Assim, no cálculo da probabilidade considera-se o número de bombas que estão operando e o número bombas que falharam nesta amostra. Não se sabe exatamente qual a probabilidade de falha de cada bomba, pois a falha é aleatória e segue uma distribuição de falhas. Entretanto, é possível inferir sua probabilidade de falha a partir de uma amostra retirada da linha de produção. Assim, testa-se um lote de bombas e estima-se a probabilidade de falha de todas as bombas a partir desta amostra.

Por fim, e não menos importante, existe a interpretação subjetiva da probabilidade. A interpretação subjetiva da probabilidade considera, de acordo Modarres; Kaminskiy; Krivtsov (1999, p.27), a probabilidade em termos subjetivos, isto é, faz uma avaliação da probabilidade a partir do uso da opinião de especialistas, assunto a ser discutido neste texto. Esta interpretação é aplicada nos casos onde os dados históricos são inexistentes, obsoletos ou não são confiáveis.

No exemplo das bombas, caso não haja registros de falhas disponíveis ou suficientes, recorre-se à opinião de especialistas para inferir uma probabilidade de falha. Na literatura, são encontrados casos práticos de atualização de taxas de falhas de bomba. Apostolakis (1982), Apostolakis et al. (1980), por exemplo, mostra os passos para uma atualização bayesiana das taxas de falha de bombas apresentadas pelo *Reactor Safety Study (RSS)* (U.S. NRC, 1975).

1.1.2. Dados, informações, conhecimento e inteligência

Goldschmidt (2010, p.18) define dados como representações sintáticas sobre eventos, mas sem apresentar um significado próprio. Quando os dados ganham um significado, estes tornam-se informações. As informações são dados processados ou calculados e que podem ser manipulados através do conhecimento. O conhecimento faz parte da inteligência de um

indivíduo que apresenta diferentes faculdades intelectuais, como a memória, imaginação, juízo, raciocínio, abstração e concepção. A este conjunto de faculdades dá-se o nome de inteligência.

A exemplificação destes conceitos pode ser realizada analisando o seguinte contexto. Quando se obtém o número de falhas de um equipamento qualquer, tem-se um dado. O cálculo da frequência ou probabilidade de falhas a partir deste dado, constitui uma informação. O critério para avaliação da confiabilidade deste equipamento a partir da taxa de falha é uma etapa do conhecimento. A hierarquia formada pelo dado, informação e conhecimento é representada por uma pirâmide, conforme mostra a Figura 1.1.

Figura 1.1 – Hierarquia entre dados, informações e conhecimento
Fonte: Adaptada de Goldschmidt e Passos (2005, p. 2)

Definir conhecimento não é uma tarefa fácil e exige um estudo bastante criterioso. A epistemologia, que é um ramo da filosofia, estuda o conhecimento refletindo em torno da natureza, etapas e limites de conhecimento humano. O conhecimento pode se apresentar de forma explícita, como sendo aquele fácil de ser comunicado e transmitido a outras pessoas, ou de forma tácita, quando este é formulado a partir das experiências do indivíduo ao longo de sua vida. A transmissão do conhecimento tácito é bastante difícil de ser formalizada devido a sua subjetividade e dependência em relação a habilidade de cada indivíduo.

Da forma mais geral, Ayyub e Klir (2006, p.49) definem o conhecimento em 3 diferentes níveis, como mostrado na Figura 1.2. O primeiro nível desta figura representa o conhecimento confiável ou *Reliable Knowledge (RK)*. O RK é um conjunto de valores formados por verdades absolutas e raciocínios errados com aparência de verdadeiros, conhecidos por falácias. O RK reflete o estado atual do conhecimento em termos de verdades e ignorância, atualizando-se a partir das novas descobertas. No segundo nível, tem-se o conhecimento progressivo infalível, ou *Evolutionary Infallible Knowledge (EIK)*. O EIK é tido como uma verdade absoluta, comportando-se como uma parcela do universo do conhecimento que é explorado a partir da evolução humana. O EIK é inatingível pelo ser humano dado o fato da sua permanente evolução com o tempo, bem como as falácias

humanas que inexistem neste universo. Engloba todas as verdades absolutas, crenças verdadeiras e a ignorância fruto do desconhecido. A intersecção entre o EIK e o RK dá origem ao terceiro nível de conhecimento, chamado de conhecimento absoluto atingido ou *Knowledge with Infallible Propositions (IK)*. O IK representa o conjunto de verdades absolutas atingidas pelos seres humanos.

Figura 1.2 – Conhecimento do ser humano
Fonte: Adaptada de Ayyub e Klir (2006)

O conhecimento do especialista, sobre um determinado assunto, é representado pelas 3 elipses representadas na Figura 1.2. A primeira, que está contida no EIK, representa o conhecimento do especialista adquirido por meio do aprendizado, captura ou desenvolvimento. A segunda, representa o conhecimento percebido pelo especialista a partir das suas experiências e a terceira seria a percepção de conhecimento a partir de outros especialistas.

A elicitação de especialistas busca justamente trabalhar dentro do IK, quantificando as incertezas que contribuam para reduzir o avanço de IK para as áreas da ignorância. Em geral, esse resultado é obtido através da aquisição de conhecimento, podendo ser realizada através de grupos homogêneos ou heterogêneos. Esta classificação leva em consideração a formação do indivíduo e sua experiência. Assim, um grupo de especialistas é considerado do tipo heterogêneo quando, na sua composição, apresentam-se especialistas com diferentes níveis de educação e posicionamento profissional. Nestes grupos é possível ter doutores, mestres, engenheiros, técnicos, operadores e outros, que irão contribuir com diferentes graus de conhecimento. Nos grupos homogêneos não há grandes variações de nível de escolaridade e experiência adquirida, sendo assim formados por uma única classe, como por exemplo um grupo de operadores de caldeiras com mais de 10 anos de experiência. Estes grupos, em geral,

apresentam uma certa limitação de conhecimento, pois seus conhecimentos estão concentrados em uma única área de atuação, seja ela acadêmica ou prática.

A escolha adequada dos grupos de especialistas vai depender essencialmente dos recursos humanos disponíveis e dos objetivos a serem alcançados. Em geral, quando existem recursos disponíveis, busca-se obter um balanceamento de opiniões práticas e teóricas a fim de obter o verdadeiro conhecimento e evitar potenciais vieses. Grupos heterogêneos são vantajosos quando se deseja ampliar o universo do conhecimento, possibilitando obter resultados mais satisfatórios. Por outro lado, grupos homogêneos, podem ser vantajosos se as qualificações do especialistas estão adequadas ao problema a ser discutido. Especialistas teóricos nem sempre contribuem em estudos práticos, assim como especialistas práticos podem ser ineficientes em estudos teóricos.

1.1.3. Métodos e Técnicas de elicitación

O surgimento de métodos e técnicas para a elicitación de especialistas ocorre a partir da década de 1950 durante estudos de previsão tecnológica. Galliano (1979, p.6) define método como um conjunto de etapas, ordenadamente dispostas, a serem vencidas na investigação da verdade, no estudo de uma ciência ou para alcançar determinado fim. A diferenciação entre método e técnica esta no fato que o primeiro termo faz referencia a “o que fazer” enquanto que o segundo diz respeito a “como fazer”. Assim, Galliano (1979, p.6) define técnica como o modo de fazer de forma mais hábil, mais segura, mais perfeita algum tipo de atividade, arte ou ofício. De forma geral o método pode ser visto como um conjunto de meios, práticas, procedimentos, regras ou técnicas dispostas convenientemente para alcançar um fim e chegar a um conhecimento científico. A técnica por sua vez pode ser generalizada como o caminho para a execução de um procedimento científico. Neste contexto, visando facilitar o entendimento geral, todos os termos serão citados como métodos, salvo aqueles que predominantemente são considerados como técnicas.

O histórico do primeiro método de elicitación de especialistas surge no ano de 1950. Apresentando um caráter estratégico para as forças aéreas americanas, os pesquisadores N.C. Dalkey, O. Helmer e N. Rescher, pertencentes à corporação *Research and Development* (RAND), desenvolveram o primeiro método para elicitación de especialistas: o método Delphi. Segundo Linstone e Turoff (2002, p.3), no ano de 1974, o método apresentou mais de 10.000

estudos, mostrando sua popularização e sua efetividade. Foram realizadas modificações no método, de forma a se adequar a diferentes situações de elicitação e reduzir suas limitações.

Os métodos, em geral, buscam extrair as informações de maneira estruturada, mas que devem ser analisadas antes de sua aplicação. Em alguns casos, por exemplo, é necessário ponderar respostas dos especialistas, em virtude das suas diferentes habilidades e conhecimentos teóricos. Estudos diversos têm aplicado pesos aos especialistas em virtude da heterogeneidade de grupos de especialistas (EMRE et al., 2015; FIRMINO; FILHO; DROGUETT, 2008; HSI; CHEN, 1996; PINTO, 2014; RENJITH et al., 2010; YUHUA; DATAO, 2005). Entretanto, a aplicação de pesos deve ser realizada com critério e, muitas vezes, auxiliada pelo alinhamento, similaridade e consenso entre os especialistas. A verificação destas variáveis contribui para garantir um melhor resultado, quando se trabalha com elicitações compostas por mais de um especialista. Estudos têm buscado verificar o alinhamento, similaridade e consenso dos especialistas, a fim de se obter um resultado mais consistente na etapa da agregação (EMRE et al., 2015; HSI; CHEN, 1996; MAZZUCHI; LINZEY; BRUNING, 2008; MODICA, 2009; PINTO, 2014). De forma geral, a quantificação destas variáveis pode ser realizada a partir de diferentes métodos. Um dos métodos mais populares é o uso do coeficiente de Kendall que tem sido amplamente usado e altamente recomendado pela *International Maritime Organization (IMO)* nos estudos que envolvem a elicitação de especialistas (IMO, 2015). Em casos específicos, o coeficiente de Kendall tem auxiliado o tomador de decisão na tarefa de eliminar as opiniões que se distanciam muito do grupo (MAZZUCHI; LINZEY; BRUNING, 2008). Outros métodos também estão presentes em diversos estudos, principalmente quando utiliza-se a lógica difusa (EMRE et al., 2015; HSI; CHEN, 1996; PINTO, 2014). A agregação das opiniões é a etapa final do processo de elicitação que pode ser realizada utilizando diferentes técnicas, sendo o uso dos percentis o mais comum. Ayyub (2000) apresenta alguns trabalhos realizando a agregação por meio de percentis. Entretanto, o uso dos percentis fica bastante limitado quando as opiniões são apresentadas em termos linguísticos. Neste caso, têm sido propostos alguns métodos mais robustos (HSI; CHEN, 1996; LU; LAN; WANG, 2006). Há ainda alguns autores que têm utilizado o método bayesiano como forma de agregar e atualizar simultaneamente os dados (APOSTOLAKIS, 1982; GOMES, 2011).

1.2. OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é discutir o uso da opinião de especialistas em estudos de confiabilidade e análise de risco, com apresentação de um estudo de caso prático. Na avaliação de acidentes hidroviários, (SAITO et al., 2015) apresentam uma análise estatística de acidentes ocorridos na Hidrovia Tietê-Paraná (HTP) onde, alguns pontos de interesse são discutidos considerando o uso da opinião de especialistas. Os autores ressaltam que existe uma previsão para o aumento do número de embarcações de etanol na hidrovia que, naturalmente podem aumentar os riscos da região. Ao se realizar uma avaliação de risco, baseado em previsões futuras, os autores apresentam a opinião de especialistas como uma das alternativas para a estimativa das frequências de ocorrência dos eventos de análise. Desta forma, os autores buscam entender, entre outros, qual seria a relação entre as opiniões dos especialistas e histórico de acidentes em hidrovias considerando um determinado contexto. Uma das particularidades deste trabalho é que os autores inicialmente não exploram em detalhes todas as etapas presentes em processo de elicitação de especialistas, mas contribuem apontando um problema que pode ser melhor explorado apresentando em detalhes a elicitação de especialistas. Neste contexto, esta dissertação faz uma revisão da literatura apresentando alguns métodos e técnicas de elicitação, que pudessem ser efetivamente aplicados no trabalho de (SAITO et al., 2015), discutindo não somente a etapa da elicitação mas, realizar uma discussão sobre os modos de agregação e combinação de opiniões, verificação do alinhamento de opiniões, calibração de especialistas e a atualização de dados a partir de métodos bayesianos. Ao final, é proposto uma reavaliação do trabalho de (SAITO et al., 2015), considerando os argumentos discutidos.

1.3. JUSTIFICATIVA PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Desenvolver e aplicar uma técnica adequada para coleta de informações de especialistas é ainda um grande desafio a ser superado, dado o grau de incerteza e ignorância decorrente do próprio processo.

Mas, por que estudar a elicitação de especialistas? Não existe uma resposta única, mas um conjunto de fatores que ajuda a entender qual a importância deste assunto dentro de um determinado contexto.

Por exemplo, na competição e concepção dos países emergentes, os custos econômicos envolvidos na tomada de decisões são um dos principais fatores que justificam o estudo da elicitación de especialistas. Uma informação mal elicitada pode acarretar enormes prejuízos financeiros envolvendo ou não perdas humanas, materiais ou ambientais. Os agravantes não se limitam somente aos perigos associados à tomada de decisões, mas também ao custo embutido nas etapas de desenvolvimento. A velocidade com que o mercado toma decisões em projetos é primordial para manter a competitividade e reduzir os custos finais do produto. Em questões estratégicas e de soberania, a elicitación mostra-se bastante efetiva na previsão tecnológica e no desenvolvimento da defesa, em termos de potencial ostensivo. Prever como uma nação reagiria em um possível conflito de guerra possibilita estruturar uma estratégia de defesa com grandes possibilidades de sucesso.

Entretanto, a elicitación de especialistas não se limita a questões financeiras e de defesa. Existe um futuro incerto, onde a velocidade da evolução tecnológica e complexidade dos sistemas muitas vezes supera a mensuração dos riscos associados. Ayyub e Klir (2006) ressaltam a existência de um futuro marcado por problemas mais complexos, onde a tomada de decisão por parte de cientistas, analistas e engenheiros deverá buscar o uso da opinião de especialistas com o objetivo de suprir a limitação dos recursos existentes e atender os prazos de execução. O tratamento adequado das incertezas associadas à opinião de especialistas é ainda um grande desafio e requer o uso de técnicas estruturadas que possibilitam obter as melhores informações dos especialistas, reduzindo as incertezas e os riscos associados.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em 7 capítulos, que serão apresentados na forma de dois blocos: um referente à fundamentação teórica e um referente a um estudo de caso prático.

No primeiro capítulo, aqui exposto, apresentou-se algumas definições, o objetivo do trabalho, a justificativa e a estrutura da dissertação que será tratada nesta seção.

No Capítulo 2 são apresentados alguns dos métodos e técnicas de elicitación disponíveis, iniciando com o método Delphi. Originário da década de 50, o método apresentava um caráter estratégico, na previsão dos impactos do avanço tecnológico sobre as guerras. O método foi aplicado exaustivamente e originou técnicas efetivas de elicitación, como a técnica *Nominal Group Technique (NGT)*. Outros desenvolvimentos foram realizados,

dando origem à análise de cenários. Tais desenvolvimentos serão discutidos em detalhes no decorrer do texto do capítulo apresentando as vantagens, desvantagens e aplicabilidade.

O Capítulo 3 é destinado à apresentação da verificação do alinhamento entre os especialistas. Neste capítulo será apresentado o coeficiente de Kendall, um importante índice que, a partir da opinião dos especialistas, permite avaliar o alinhamento existente entre eles. Exemplos e algumas limitações serão apresentadas, discutindo as possíveis inconsistências que podem ser geradas no processo.

A verificação do alinhamento entre especialistas é uma etapa passiva pois, de forma geral, ela apenas indica as divergências que podem existir entre as respostas dos especialistas. Se estas divergências não forem tratadas durante o processo de eliciação é possível utilizar o processo de calibração de especialistas como uma forma reduzir o distanciamento entre as opiniões. Este processo, discutido no Capítulo 4, permite ajustar melhor as respostas dos especialistas de forma a conter as possíveis divergências e permitir a combinação ou agregação das opiniões. Estes assuntos também são tratados no Capítulo 4, onde métodos de combinação matemáticos e baseados no comportamento do indivíduo são apresentados.

O capítulo 5 é destinado a apresentar o modelo bayesiano aplicado a eliciação de especialistas. Por ser um modelo bastante flexível, este permite tanto atualização de frequências de ocorrências de eventos, como na calibração dos especialistas. O capítulo trará alguns exemplos numéricos que visam facilitar o entendimento dos métodos e suas utilidades.

O Capítulo 6 retorna alguns conceitos discutidos anteriormente na forma de uma aplicação prática. Nesta aplicação é discutido a relação existente entre as opiniões dos especialistas e os dados históricos considerando os acidentes na HTP. Baseado nas técnicas abordadas e discutidas nos capítulos anteriores, o estudo busca estabelecer a probabilidade de ocorrência de alguns eventos a partir da opinião de especialistas.

Por fim, no último capítulo são apresentadas as conclusões, recomendações, dificuldades e considerações obtidas neste trabalho, oriundas do ensejo de apresentar um tema extremamente relevante e que, por muitas vezes, é aplicado indevidamente ou ignorado devido à falta de conhecimento adequado.

2. MÉTODOS E TÉCNICAS PARA A ELICITAÇÃO DE ESPECIALISTAS

A elicitação dos especialistas compõe uma das primeiras etapas onde serão obtidos os conhecimentos e as incertezas dos especialistas. Os métodos e técnicas podem ser classificados de acordo com o tipo de elicitação. Os métodos e técnicas ditos diretos visam obter a informação de forma direta do especialista e serão apresentados na Seção 2.1. Já os métodos e técnicas indiretos buscam elicitar a informação, trabalhando as respostas de forma a chegar a um consenso. Estes últimos serão discutidos na Seção 2.2. Na Seção 2.3 será discutida a combinação aos pares, um método que propõe a segmentação de um conjunto de dados na forma de pares que irão facilitar o comparativo e a classificação destes a partir de critérios preestabelecidos. Na elicitação de especialistas a comparação aos pares pode ser utilizada tanto no processo de classificação de opiniões como na calibração de especialistas. Por fim, será apresentada a técnica paramétrica na Seção 2.4, que é uma técnica que tem como objetivo avaliar o intervalo de confiança de um parâmetro de interesse.

2.1 MÉTODOS E TÉCNICAS DE ELICITAÇÃO DIRETA

Na elicitação direta, o especialista é questionado sobre um determinado problema sobre o qual ele irá opinar diretamente, apresentando assim um resultado instantâneo. Uma das vantagens deste método reside no fato de que o processo de elicitação torna-se mais ágil, diminuindo o tempo necessário para a elicitação. Por outro lado, a elicitação direta pode comprometer os resultados, visto que, em geral, não permite mensurar as consistências das respostas. Um dos métodos direto mais populares é o Delphi, que será discutido em detalhes na Seção 2.1.1. Também será discutida a técnica nominal de grupo na Seção 2.1.2, que apresenta uma grande similaridade com o método Delphi. Por fim, na Seção 2.1.3, será apresentada a técnica de análise de cenários que visa, entre outros, descrição de eventos futuros.

2.1.1. Método Delphi

É um método estruturado desenvolvido, na década de 1950, pelos pesquisadores da RAND Corporation. Inicialmente, por envolver questões de segurança, o uso e acesso do Delphi estava restrito aos desenvolvedores que, dez anos mais tarde, divulgaram para o

público geral. Em sua concepção, objetivou-se aperfeiçoar o uso da opinião de especialista na previsão tecnológica.

Uma das grandes aplicações do método Delphi e a pioneira na avaliação subjetiva da Análise Probabilística de Segurança (APS) foi o *Reactor Safety Study (RSS)*, reportado no *WASH 1400 (NUREG 75/014)*. Este estudo foi empreendido pela *USAEC* em 1972, sendo concluído e publicado pela comissão reguladora nuclear americana em 1975. O estudo buscou avaliar o risco de operação presente em 100 reatores do tipo água leve nos Estados Unidos, baseado nas usinas *Surry*, tipo *Pressurized Water Reactor (PWR)* e *Peach Bottom*, do tipo *Boiling Water Reactor (BWR)* (CARVALHO, 2007).

Além do uso do método Delphi no RRS, o método também foi aplicado pelo IEEE na elaboração da IEEE Std-500, uma coletânea que contém dados de falha de componentes elétricos, eletrônicos e de sensoriamento (ANSI/IEEE, 1984). Os dados foram obtidos a partir da elicitación de 200 especialistas, onde cada um opinou sobre as taxas de falha que os componentes poderiam assumir em termos de seus valores inferiores, superiores e os recomendados. Neste processo de elicitación, foram consideradas as condições normais de operação, sendo os casos atípicos mensurados por um valor máximo também estimado pelos especialistas. Os resultados obtidos foram agregados com base na técnica da média geométrica que, segundo Apostolakis (1982), dá uma melhor representação das estimativas dos especialistas, representadas geralmente em termos de potências negativas na base dez. Como efeito, foi possível utilizar as médias aritméticas dos expoentes.

Embora a norma não defina precisamente uma distribuição a ser atribuída, Apostolakis (1982) sugere o ajuste dos dados em uma distribuição lognormal. A escolha desta distribuição tem relação com o fato dos dados serem calculados a partir da média. O autor também ressalta para o uso do valor recomendado. Nem sempre este valor é o mais adequado e esta sujeito a diferentes interpretações. Neste caso, o uso do valor mediano ao invés do valor recomendado (média) é mais adequado pois, em distribuições lognormais, a mediana é um valor que representa melhor a tendência central, além de ser muito mais sensível nas caudas das distribuições. Isto sugere que os especialistas podem ter apresentado suas estimativas tendo em mente valores medianos.

Outras aplicações são encontradas na literatura, não sendo raros os casos onde o método é aplicado em combinação com outros conceitos. Por exemplo, Hsi e Chen (1996) utilizam o método Delphi na estimação de valores difusos. Para esta aplicação os autores buscam determinar o intervalo mais provável de uma variável, assim como os valores máximos e mínimos que esta variável pode assumir. A elicitación é realizada a partir do

método Delphi, onde são determinados os valores que irão delimitar os números difusos. Renjith et al. (2010) aplica o método Delphi na determinação dos possíveis eventos que possam levar a um vazamento de cloro em uma indústria. Yuhua e Datao (2005) através de seções Delphi busca determinar as probabilidades dos eventos que podem levar à falha de tubulações de condução de gás. São muitos os casos onde se aplica o método, considerando sempre a busca pelo consenso entre os especialistas, característica principal do método e que será discutida na Seção 2.1.1.1

2.1.1.1. Características do método

A principal característica do método Delphi é obter o consenso entre os especialistas através da aplicação de uma série de questionários a serem respondidos de maneira anônima. O anonimato aplicado ao método tem como objetivo reduzir os efeitos indesejáveis de uma interação em grupo, como por exemplo o viés da ancoragem, que ocorre quando a opinião dada por um ou mais especialistas é seguida por um ou pelos demais especialistas mesmo que não compartilhem totalmente a ideia. Assim, o procedimento engloba três características distintas: o anonimato dos especialistas, a representação estatística da distribuição dos resultados e o feedback de respostas do grupo.

Em geral, os questionários são aplicados por um moderador, que irá conduzir o processo explicitando inicialmente os detalhes do problema, as questões a serem abordadas, bem como agregar as opiniões para o feedback e reavaliação das respostas subsequentes dos especialistas. O moderador, neste caso, é um tomador de decisão, que deve ter habilidades para interpretar as respostas dos especialistas e conduzir o processo de forma a obter o consenso. O processo é conduzido em rodadas, que são realizadas até se conseguir o consenso entre os especialistas. Em geral, este consenso é atingido em até 3 rodadas, sendo possíveis casos com um maior número de rodadas em função da concordância entre os especialistas e quantidade de informação que esta sendo elicitada (DELBECQ; VAN DE VEN; GUSTAFSON, 1986, p. 103). Por não exigir o confronto de ideias diretamente com os participantes, o método possibilita a realização do processo em um ambiente virtual. Helmer (1968) *apud* Ayyub (2001, p.99) enumera os passos básicos do método:

- 1) Desenvolvimento dos questionários através da seleção do tema ou questões a serem abordadas;
- 2) Seleção dos especialistas;

- 3) Detalhamento e familiarização do tema junto aos especialistas;
- 4) Elicitação dos especialistas;
- 5) Agrupamento e apresentação dos resultados na forma de valores medianos e na faixa de interquartis, ou seja, considerando a medida de espalhamento da amostra;
- 6) Revisão dos resultados e reavaliação das respostas dadas pelos especialistas. Nesta etapa, os especialistas que mantiverem as suas opiniões fora dos intervalos dos interquartis devem reavaliar ou justificar suas escolhas na segunda rodada;
- 7) Revisão dos resultados para outra rodada. O processo repete-se até que ocorra o consenso;
- 8) Apresentação dos resultados finais.

É importante destacar que, por buscar o consenso e permitir a reavaliação das respostas dos especialistas, espera-se que os resultados da última rodada apresentem uma menor dispersão quando comparados aos resultados anteriores. Em geral, os valores médios são apresentados como as melhores estimativas para o problema ou questionamento.

2.1.2. Técnica Nominal de Grupo

A Técnica Nominal de Grupo ou *Nominal Group Technique (NGT)* foi desenvolvida por Andre Delbecq e Andrew Van de Ven em 1968 (DELBECQ; VAN DE VEN; GUSTAFSON, 1986, p.7). É uma técnica que foi desenvolvida a partir do método Delphi com o objetivo de priorizar a interação entre os especialistas a partir do desenvolvimento de ideias em grupo. A técnica busca o consenso dos especialistas de forma estruturada, evitando a influência entre os especialistas. A principal característica da técnica é que ela permite o confronto direto entre os especialistas, em virtude da realização da elicitação de maneira presencial (*face to face*). Os principais objetivos da técnica são: garantir a investigação e avaliação do problema ou questão a partir da geração e síntese dos dados, balancear a participação de todos os especialistas e incorporar as técnicas matemáticas de voto na agregação do julgamento em grupo. O uso da técnica é resumido aplicando os seguintes passos:

- 1) Geração de ideias: Em um processo de *brainstorming* cada especialista irá registrar em um papel suas ideias de forma individualizada, isto é, sem que ocorra a consulta ou debate com os demais especialistas.

- 2) Apresentação das ideias: Cada especialista irá apresentar sua ideia, em um processo *round-robin*. Segundo Delbecq; Van de Ven; Gustafson (1986, p. 46) *round-robin* é um processo para registro de ideias onde cada participante fornece uma ideia por vez, sem que ocorra qualquer debate ou justificativa sobre suas ideias. Em alguns casos, o líder pode verificar quantos participantes compartilham a mesma ideia, registrando e combinando as ideias compartilhadas. As ideias são registradas em um painel e apresentadas a todos os participantes.
- 3) Clarificação: As ideias são esclarecidas com o objetivo de entender o que cada ideia representa no contexto. O questionamento é permitido, desde que este não esteja relacionado com a concordância ou discordância do especialista em relação às ideias apresentadas. É importante destacar que este passo se trata apenas de um esclarecimento de ideias, não uma seção onde os participantes vão debater as ideias expondo diretamente seus pontos de vista.
- 4) Votação: Cada especialista irá votar nas ideias apresentadas, podendo priorizá-las conforme a sua relevância. Ao final, é apresentado o resultado da votação.

A técnica de grupo nominal é uma técnica mais estruturada e completa usada principalmente na solução de problemas com o principal objetivo de desenvolver consenso na equipe. Diferentemente dos modelos que utilizam as discussões presenciais, a técnica NGT apresenta a vantagem de minimizar a influência entre participantes, garantindo assim a participação de todos os especialistas. Esta característica é assegurada pela geração individual de ideias, onde não há comunicação entre os participantes durante o *brainstorming*.

A técnica não é tão popular como o método Delphi, entretanto é possível encontrar aplicações nas mais diversas áreas. Ford; Richards e Hungerford (1998), por exemplo, utilizam a técnica NGT na definição da sinalização de vagões de carga para a prevenção de acidentes. O objetivo da pesquisa é melhorar a visibilidade de vagões de carga durante o período noturno onde, nos cruzamentos, há um risco maior de colisão entre veículos e vagões de carga. O estudo se iniciou com uma seleção de 6 especialistas em um grupo de 28 indivíduos com experiência em ferrovias, engenharia de tráfego e fatores humanos. Nesta pesquisa, optou-se por trabalhar com grupos heterogêneos formados por acadêmicos, consultores de engenharia, empregadores de ferrovias e agentes públicos. Os especialistas foram elicitados para esboçar um refletor ideal de sinalização para vagões de carga, incluindo um breve descritivo. As respostas deveriam ser elaboradas considerando a forma geométrica, sua distribuição no vagão e suas cores. Algumas amostras de refletores comerciais foram apresentadas aos especialistas antes da geração de ideias. Cada especialista recebeu os

recursos necessários para geração de ideia, incluindo desenhos do vagão de carga, lápis, marcadores (para representar as cores comerciais dos refletores) e outros. Em um processo *round-robin*, cada especialista apresentou sua ideia e iniciou-se a etapa da clarificação, onde os desenhos foram numerados e esclarecidos para o grupo. A partir desta etapa os especialistas foram convidados a escolher o refletor mais adequado numerando em uma escala de 0 a 8, sendo o 8 o menos adequado. Os resultados obtidos podem ser visualizados em (FORD; RICHARDS; HUNGERFORD, 1998).

2.1.3. Análise de Cenários

O desenvolvimento da técnica análise de cenários pode ser atribuído a Kahn e Wiener (1967) *apud* Ayyub (2001, p. 105). Cenários são sequências hipotéticas de eventos construídas com o propósito de focar a atenção nas causas dos processos e nos pontos de decisão. Assim, na análise de cenários busca-se descrever futuras consequências explicitando os possíveis eventos causais. Diferentemente das técnicas discutidas anteriormente, a análise de cenários é uma técnica perceptiva que visa auxiliar a tomada de decisão, antecipando as soluções. A técnica pode ser utilizada em conjunto com outras técnicas de prospecção suprimindo as limitações na investigação das alternativas e consequências de um dado cenário. A análise de cenários deve responder a duas questões:

- 1) Precisamente, passo a passo, como alguma situação hipotética poderia acontecer?
- 2) Que alternativas existem para cada ação, em cada etapa para prevenir, desviar ou facilitar o processo?

De acordo com Ayyub (2001), a primeira questão é tratada de forma semelhante à análise da árvore de eventos enquanto a segunda esta associada a árvores de decisão, como será exemplificado a seguir.

A Figura 2.1 exemplifica uma árvore de eventos adaptada do estudo do RSS. Esta adaptação, desenvolvida por Ayyub; Mccuen (2011, p. 530), considera a falha de uma tubulação como evento iniciador que, caso ocorra, poderá resultar em uma liberação radioativa na planta. Esta liberação esta caracterizada por 16 tipos de cenários diferentes que são representados pelos últimos ramos da árvore. No melhor dos cenários, ocorre uma mínima liberação de material radioativo e no caso mais crítico há uma máxima liberação. Estados intermediários também estão definidos e dependem essencialmente dos 4 eventos subsequentes que podem ou não ocorrer. A representação do RSS na forma de árvore de

eventos permite a consideração cronológica dos eventos e a identificação dos possíveis cenários após a ocorrência do evento iniciador; o primeiro evento E da árvore representa o evento iniciador, isto é a ruptura da tubulação. Segundo a árvore de eventos desenvolvida, se este evento ocorrer isoladamente, haveria uma mínima liberação de material radioativo (*Very small radioactive release*), não provocando grandes consequências. Desta forma, a partir da ocorrência do evento E subsequentes eventos podem ocorrer sequencialmente sendo: a falha do sistema elétrico (E1), a falha do sistema de refrigeração de emergência do reator nuclear (E2), a falha na remoção do produto de fissão (E3) e por último a falha de integridade da contenção (E4), cujas probabilidades de ocorrência são representadas, respectivamente, por $P(E)$, $P(E1)$, $P(E2)$, $P(E3)$, e $P(E4)$. Considerando estes eventos como independentes entre si, a probabilidade de ocorrência de um evento não é afetada pela ocorrência de um dos demais eventos. Desta maneira, a probabilidade de ocorrência de cada cenário é calculada a partir do produto das probabilidades dos eventos que compõem a sequência acidental, onde a probabilidade de não ocorrência para eventos mutuamente excludentes é dada por $P(\bar{E}x) = 1 - P(Ex) \rightarrow x = \{1,2,3,4\}$. Considerando o cenário mais crítico, onde todos os sistemas falham e ocorre uma máxima liberação de material radioativo, a probabilidade de ocorrência pode ser calculada por $P = P(E) \times P(E1) \times P(E2) \times P(E3) \times P(E4)$. Para os demais cenários, segue-se a mesma lógica considerando sempre a ocorrência ou não de cada evento no respectivo cenário, determinando assim o tipo de consequência e sua probabilidade de ocorrência.

Pipe break	Electric power	Emergency core cooling system	Fission product removal	Containment integrity	Tree branch probability	Consequences
Initiating event $P(E)$	Survival $1 - P(E1)$	Survival $1 - P(E2)$	Survival	Survival, $1 - P(E4)$	$P(E)(1 - P(E1))(1 - P(E2))(1 - P(E3))(1 - P(E4))$	Very small radioactive release
			Failure, $P(E3)$	Failure, $P(E4)$	$P(E)(1 - P(E1))(1 - P(E2))(1 - P(E3))P(E4)$	Small radioactive release
			Survival, $1 - P(E3)$	Survival, $1 - P(E4)$	$P(E)(1 - P(E1))(1 - P(E2))P(E3)(1 - P(E4))$	Small radioactive release
			Failure, $P(E3)$	Failure, $P(E4)$	$P(E)(1 - P(E1))(1 - P(E2))P(E3)P(E4)$	Medium radioactive release
		Failure $P(E2)$	Survival, $1 - P(E3)$	Survival, $1 - P(E4)$	$P(E)(1 - P(E1))P(E2)(1 - P(E3))(1 - P(E4))$	Large radioactive release
			Failure, $P(E3)$	Failure, $P(E4)$	$P(E)(1 - P(E1))P(E2)(1 - P(E3))P(E4)$	Large radioactive release
			Survival, $1 - P(E3)$	Survival, $1 - P(E4)$	$P(E)P(E1)P(E2)P(E3)(1 - P(E4))$	Large radioactive release
			Failure, $P(E3)$	Failure, $P(E4)$	$P(E)P(E1)P(E2)P(E3)P(E4)$	Very large radioactive release
	Failure $P(E1)$	Survival $1 - P(E2)$	Survival	Survival, $1 - P(E4)$	$P(E)P(E1)(1 - P(E2))(1 - P(E3))(1 - P(E4))$	Very large radioactive release
			Failure, $P(E3)$	Failure, $P(E4)$	$P(E)P(E1)(1 - P(E2))(1 - P(E3))P(E4)$	Very large radioactive release
			Survival, $1 - P(E3)$	Survival, $1 - P(E4)$	$P(E)P(E1)(1 - P(E2))P(E3)(1 - P(E4))$	Very large radioactive release
			Failure, $P(E3)$	Failure, $P(E4)$	$P(E)P(E1)(1 - P(E2))P(E3)P(E4)$	Very large radioactive release
		Failure $P(E2)$	Survival, $1 - P(E3)$	Survival, $1 - P(E4)$	$P(E)P(E1)P(E2)(1 - P(E3))(1 - P(E4))$	Very large radioactive release
			Failure, $P(E3)$	Failure, $P(E4)$	$P(E)P(E1)P(E2)(1 - P(E3))P(E4)$	Very large radioactive release
			Survival, $1 - P(E3)$	Survival, $1 - P(E4)$	$P(E)P(E1)P(E2)P(E3)(1 - P(E4))$	Very large radioactive release
			Failure, $P(E3)$	Failure, $P(E4)$	$P(E)P(E1)P(E2)P(E3)P(E4)$	Very large radioactive release

Figura 2.1 – Árvore de eventos do sistema de segurança do reator nuclear

Fonte: Ayyub e Mccuen (2011)

Diferentemente das árvores de eventos, as árvores de decisão são ferramentas de estruturação de problemas que objetivam auxiliar a tomada de decisão sob incertezas. Nas árvores de decisão, os nós de decisão são representados por quadrados e as possibilidades por círculos. As alternativas são apresentadas pelos ramos da árvore originários dos quadrados e os possíveis resultados são representados pelos ramos da árvore originários dos círculos. A consequência é atribuída no fim de cada ramo da árvore, onde podem ser obtidas as probabilidades de ocorrência de cada consequência. Em geral, os cenários, alternativas e consequências são definidas pelos especialistas, segundo suas crenças cabendo ao tomador de decisão a escolha do caminho mais adequado para uma determinada ação.

Um exemplo bastante clássico na tomada de decisão sobre incerteza foi o caso das petrolíferas Pennzoil e Getty Oil reportado por Clemen e Reilly (2013). Em 1984, estas empresas firmaram um acordo de fusão que, em função de uma proposta mais agressiva ofertada pela Texaco, acabou não ocorrendo. Desta forma, a Getty Oil foi adquirida pela empresa Texaco que mais tarde incorreu em uma grande batalha judicial movida pela Pennzoil. A Pennzoil recorreu através dos tribunais de justiça alegando que a Texaco agiu de forma ilegal, interferindo no negócio Pennzoil-Getty. Os tribunais julgaram como procedente a ação e condenaram a Texaco a pagar um valor de 10,3 bilhões. Esta indenização, na época, foi considerada maiores ocorridas nos EUA. Sem possibilidades de se manter no mercado a Texaco propôs algumas negociações intermediárias onde, a Pennzoil aceitou o pagamento de 3 milhões de dólares pela Texaco. Clemen e Reilly (2013) simplificou este caso a partir de uma árvore de decisão, conforme mostra a Figura 2.2. Nesta árvore de decisão, os autores representaram as propostas e contrapropostas ofertadas pelas empresas através dos ramos das árvores e agregou a estes, as chances de aceitação de cada oferta. O caminho a ser seguido nas negociações determinou as possíveis consequências que foram representadas ao fim de cada ramo.

Figura 2.2 – Árvore de decisão do caso Texaco-Pennzoil
Fonte: Adaptado de Clemen e Reilly (2013)

Inicialmente a Texaco estabeleceu um valor de indenização de 2 bilhões de dólares, que esta representado no ramo superior da árvore de decisão. No caso de uma aceitação desta oferta pela Pennzoil, esta receberia imediatamente os 2 bilhões de dólares. Entretanto, a Pennzoil acredita que o valor de 5 bilhões de dólares é uma proposta mais interessante, e considera este valor como uma segunda opção a ser considerada. Esta opção esta representada no segundo ramo inferior da árvore de decisão e há uma chance de 50% de recusa desta proposta contra 17% de aceitação. Além destas alternativas, existe ainda uma terceira opção, com probabilidade de 33%, referente à proposição de uma contraoferta de 3 bilhões pela Texaco. Considerando o caso mais provável, isto é a recusa da contraoferta pela Texaco, o caso seria decidido no tribunal de justiça, onde existiriam as chances de 20% e 50% da Texaco ser condenada a pagar 10,3 bilhões de dólares e 5 bilhões de dólares, respectivamente. Existiria também a possibilidade da Texaco ser absolvida e ganhar a causa com uma chance de 30%. Estas opções estão apresentadas nos demais ramos da árvore.

Analisando as propostas e contrapropostas ofertadas pelas empresas, é possível solucionar esta árvore de decisão a partir do cálculo do valor esperado de cada nó, determinando a proposta mais vantajosa. Esta depende da análise que se quer obter. Se o problema esta relacionado ao custo, o analista deve buscar sempre o menor valor, caso contrário busca-se o oposto. Deve-se levar em conta que o valor esperado age como um indicador e não representa necessariamente o valor o com que a empresa terá que arcar ou receber.

Assim, inicialmente a solução da árvore é obtida calculando-se os nós de decisão que deve ser realizado da direita para a esquerda. O primeiro nó a ser calculado é o de número 2 que representa o valor esperado da decisão do tribunal. Este valor pode ser obtido a partir da soma dos valores das indenizações multiplicadas por suas respectivas probabilidades, conforme mostra a Eq. (2.4).

$$EMV_{nó\ 2} = 10,3 \times 0,2 + 5 \times 0,5 + 0 \times 0,3 = 4,56 \text{ bilhões de dólares} \quad (2.1)$$

O resultado obtido pressupõe que a indenização de 3 bilhões de dólares não é vantajosa para a Pennzoil, considerando que o valor esperado é superior a 3 bilhões. Neste caso, visando obter a maximização da indenização, o analista da Pennzoil tem a possibilidade de descartar esta negociação, rompendo o ramo desta árvore. Este rompimento é representado através de dois traços transversais no ramo na árvore de decisão, conforme mostra a Figura 2.3.

Figura 2.3 – Árvore de decisão Texaco-Pennzoil após o cálculo do valor esperado dos tribunais
Fonte: Adaptado de Clemen e Reilly (2013)

O mesmo procedimento é realizado em relação ao nó 1, onde se obtém o valor esperado de $EMV_{nó\ 1} = 4,63$. Este resultado está detalhado conforme mostra a Eq. (2.2).

$$EMV_{nó\ 1} = 5 \times 0,17 + 4,56 \times 0,5 + 4,56 \times 0,33 = 4,63 \text{ bilhões de dólares} \quad (2.2)$$

Neste caso, o valor esperado supera a proposta de 2 bilhões, indicando que a recusa da oferta de 2 bilhões seria a alternativa mais rentável. A simplificação deste ramo após a resolução dos nós pode ser apresentada conforme mostra a Figura 2.4.

Figura 2.4 – Simplificação da árvore de decisão Texaco-Pennzoil
Fonte: Adaptado de Clemen e Reilly (2013)

Desta forma, a solução da árvore de eventos esta completa, conforme mostra Figura 2.5 e resta agora determinar as probabilidades de ocorrências das consequências.

Figura 2.5 – Árvore de decisão após solução de todos os nós
Fonte: Adaptado de Clemen e Reilly (2013)

As consequências estão representadas pelas indenizações e podem ocorrer em diferentes faixas de valores. No caso mais simples, onde há um acordo inicial para o pagamento de 2 bilhões de dólares, a probabilidade da Pennzoil receber este valor é de 100%. Nos demais casos, como no caso da condenação a pagar uma indenização de 10,6 milhões de dólares, deve ser observado o número de vezes que esta consequência ocorre na árvore. Para o caso da condenação e indenização de 10,6 bilhões de dólares, observa-se que esta consequência pode ocorrer em 3 casos diferentes. O primeiro caso considera a aceitação da indenização de 5 bilhões com probabilidade de 17%. No segundo caso, tem-se a possibilidade

de 50% da Texaco recusar a indenização de 5 bilhões e submeter-se ao tribunal com chance de 50% de ser condenada e pagar os 5 bilhões. Assim, a probabilidade de ocorrência deste evento é de 25%, que é obtido a partir do produto das probabilidades de cada ramo. De forma similar, calcula-se a probabilidade do terceiro e último caso, onde a Texaco após uma tentativa de acordo de 3 bilhões infrutífera, é condenada pelos tribunais a pagar a quantia de 5 bilhões de dólares. Neste caso, a probabilidade de ocorrência é de 16,5%. Desta forma, o cálculo da probabilidade da Texaco ser condenada a pagar 5 bilhões é dado pela soma das probabilidades de cada ramo conforme mostra a Eq. (2.3).

$$P_{\substack{\text{Indenizar} \\ 5 \text{ bilhões}}} = 0,17 + (0,5 \times 0,5) + (0,33 \times 0,5) = 58,5\% \quad (2.3)$$

Os resultados para os demais casos foram calculados da mesma forma e estão apresentados na Tabela 2.1. Nesta tabela, estão associadas as possíveis alternativas, os valores esperados e as consequências (indenizações) com suas respectivas probabilidades. Estes valores irão ajudar o analista a encontrar a melhor alternativa em função dos objetivos a serem alcançados e perfil de risco da empresa.

Tabela 2.1 – Alternativas, valores esperados, consequências e probabilidades para o caso Texaco-Pennzoil

Alternativa	EMV	Consequência	Probabilidade
Aceitar 2 bilhões	2 bilhões	2 bilhões	$P = 100\%$
Realizar contraoferta	4,65 bilhões	0	$P = (0,5 \times 0,3) + (0,33 \times 0,3) = 24,9\%$
		5 bilhões	$P = 0,17 + (0,5 \times 0,5) + (0,33 \times 0,5) = 58,5\%$
		10,6 bilhões	$P = (0,5 \times 0,2) + (0,33 \times 0,2) = 16,6\%$

2.2. MÉTODOS E TÉCNICAS DE ELICITAÇÃO INDIRETA

Enquanto os métodos e técnicas de elicitação direta questionam o especialista diretamente a respeito da questão a ser respondida, na elicitação indireta o especialista é questionado sobre suas preferências e o resultado é obtido a partir de suas respostas. As técnicas e métodos indiretos apresentam a vantagem de permitir a avaliação da consistência das respostas durante a elicitação e, muitas vezes, não exigem um elevado conhecimento do especialista, visto que o resultado final não é obtido diretamente do especialista, mas sim a partir da avaliação de suas respostas. Ramsey (1931) e De Finetti (1937) *apud* Cooke (1991) introduziram a técnica betting rates que, a partir da teoria da possibilidade, permite inferir

probabilidades de ocorrência conforme será discutido na Seção 2.2.1. Firmino; Filho e Droguett (2008), visando equilibrar a acurácia, completeza e eficiência entre os especialistas propuseram o método de educação bayesiano baseado no algoritmo binário. Este método será discutido detalhadamente na Seção 2.2.2.

2.2.1. Betting rates (Taxas de Apostas)

Considerada a técnica de elicitação mais popular entre os teóricos (COOKE, 1991, p. 122), a técnica betting rates baseia-se em taxas de apostas, avaliando de forma indireta e subjetiva a probabilidade de ocorrência do evento de interesse. Apesar da sua popularidade, é raro encontrar aplicações práticas que utilizem esta técnica, pois sua aplicação envolve situações pouco praticáveis. Estas situações, em geral, são caracterizadas por eventos que envolvem perdas ou tragédias, onde um apostador não ficaria confortável em receber um prêmio na ocorrência deste tipo de evento. A fundamentação teórica da técnica baseia-se em determinar a probabilidade de ocorrência de um evento $p(A)$ em função do valor máximo $x\$_{max}$ atribuído a um bilhete de loteria.

A técnica betting rates avalia a disposição do especialista em apostar a quantia de $x\$$ para a ocorrência do evento A considerando que, caso o evento ocorra, o especialista receberá o prêmio $\$P_A$ e caso o evento não ocorra, ele perderá $x\$$. À medida que $x\$$ aumenta, a loteria vai se tornando menos atrativa até o ponto que o especialista se apresenta indiferente à aposta. Neste ponto, o valor da aposta atinge um valor máximo $x\$_{max}$ que é denominado equivalente certo. O equivalente certo é o valor máximo que o especialista está disposto a apostar, ou seja, o especialista está indiferente à aposta, sendo indiferente receber $\$P_A$ ou não pagar $x\$$. Neste ponto, considerando a utilidade como sendo linear, é possível calcular a probabilidade de ocorrência do evento A conforme apresenta a Eq. (2.4).

$$p(A) = \frac{x\$_{max}}{\$P_A} \quad (2.4)$$

Como exemplo, suponha que um especialista atribua um valor anual máximo de R\$1.000,00 a ser pago a uma seguradora que indenizará em R\$5.000.000,00 uma unidade industrial no caso da ocorrência de um acidente catastrófico. Nesta condição, se a seguradora oferecer um seguro com custo superior a R\$1.000,00 o especialista optaria por não realizar o

seguro e consequentemente correr o risco de arcar com o custo de R\$5.000.000,00 no caso de ocorrência do acidente. Assim, a probabilidade de ocorrência do evento catastrófico pode ser estimada a partir da Eq. (2.5).

$$p(A) = \frac{1.000,00}{5.000.000,00} = 2 \times 10^{-4} / ano \quad (2.5)$$

Apesar da técnica betting rates mostrar-se bastante popular, Ayyub (2001, p.113) sugere que a técnica betting rates pode não ser adequada para a avaliação de probabilidades de falha, uma vez que estes valores são muito baixos.

2.2.2. Método de Firmino e Droguett

Desenvolvido por Firmino e Droguett (2015), o método propõe ao especialista selecionar, conforme suas crenças e/ou preferências, um dos dois subintervalos resultantes da partição ao meio de um intervalo inicial. Em seguida, o especialista atribui um nível de credibilidade para a sua escolha. Objetivando manter a coerência do método, o valor da credibilidade a ser atribuído deve ser superior a 50%, já que um valor inferior indicaria uma preferência para o intervalo não selecionado. Em uma segunda etapa, o subintervalo selecionado é dividido novamente ao meio para uma nova escolha do especialista. Assim, o processo é repetido indefinidamente até o momento em que o especialista não se sinta confortável para novas respostas. Baseado nas preferências do especialista, determinam-se os intervalos de crença, denominados bayesianos. Esses intervalos possibilitam a estimativa da distribuição de probabilidades subjacente às incertezas do especialista sobre o estudo. O exemplo a seguir, de elaboração própria, apresenta as interações e resultados obtidos em uma seção composta por 5 respostas dadas por um especialista sobre a chance de ocorrência de um evento **E**.

A probabilidade de ocorrência do evento **E** é dada por uma variável aleatória **x**, que inicialmente está contida no intervalo **A**. A partir da propriedade que a probabilidade de ocorrência de um evento deve assumir necessariamente valores entre 0 e 1, atribui-se ao intervalo **A** os limites inferior e superior de 0% 100%, com $P(x_A)=100\%$, onde $P(x_A)$ é a probabilidade da variável aleatória **x** estar contida no intervalo **A**. Durante a primeira interação, o intervalo **A** é dividido ao meio, formando os subintervalos **a₁** e **a₂**. O subintervalo

a_1 corresponde aos valores de probabilidades contidos entre 0% e 50% e o subintervalo a_2 corresponde aos valores de probabilidades contidos entre 50 e 100%. Com o intervalo inicial A , o especialista deve opinar, segundo sua crença, a respeito de qual dos subintervalos a_1 ou a_2 a variável x se encontra, atribuindo um nível de credibilidade para a sua escolha. Na primeira interação, o especialista seleciona o subintervalo a_1 , sugerindo a probabilidade de 95% da variável aleatória estar contida neste intervalo. Baseado no complemento de a_1 para 100% obtém-se o valor de 5% da variável x estar contida no subintervalo a_2 .

O próximo intervalo, B , é formado a partir do subintervalo anterior selecionado pelo especialista, isto é o subintervalo a_1 . Assim, os limites do intervalo B corresponderão aos mesmos limites do subintervalo a_1 , apresentando o limite inferior de 0% e limite superior de 50%. O intervalo B é dividido ao meio, onde se obtém o valor médio de 25%, e dois novos subintervalos b_1 e b_2 . O subintervalo b_1 tem como limite inferior o menor valor contido em B e o limite superior igual à média de B . Já o intervalo b_2 apresenta como limite inferior à média de B e como limite superior o maior valor contido em B . O especialista é elicitado novamente para escolha entre os subintervalos b_1 e b_2 e atribui sua escolha ao subintervalo b_2 com 70% credibilidade para sua resposta. De maneira análoga, obtém-se a probabilidade de 30% de probabilidade da variável x estar contida no intervalo b_1 , em função do complemento de b_2 para 100%. O próximo intervalo, C , é determinado de maneira similar à descrita anteriormente, sendo equivalente ao subintervalo b_2 , apresentando limites de 25% e 50%. O intervalo C é dividido ao meio dando origem aos subintervalos c_1 e c_2 . Os valores que delimitam estes intervalos seguem a mesma metodologia descrita anteriormente, sendo c_1 formado pelo conjunto de valores variando de 25% a 37,5% e c_2 formado pelo conjunto de valores variando de 37,5% a 50%. Em uma terceira interação, o especialista é elicitado e seleciona o intervalo c_1 com credibilidade de 60%. É importante destacar, neste ponto, que os valores de credibilidade devem decrescer em função das interações, visando manter uma coerência no método. O processo é repetido para os demais intervalos e subintervalos, onde sucessivas escolhas são realizadas pelo especialista. Na sexta interação, onde o especialista deve optar entre os subintervalos f_1 e f_2 , ocorre a indiferença do especialista, finalizando assim o processo de elicitación. O resumo dos intervalos, subintervalos formados e preferências do especialista estão apresentados na Tabela 2.2, onde $P(x_n)$ é a probabilidade da variável aleatória estar contida no intervalo “ n ”.

Tabela 2.2 – Intervalos, subintervalos e preferências do especialista						
Intervalos	Subintervalos 1		Subintervalos 2		Preferências do Especialista	
	Limite Inferior	Média	Limite Superior	Seleção	$P(x_n)$	$1-P(x_n)$
A	0,000	50,000	100,000	a_1	95,00%	5%
B	0,000	25,000	50,000	b_2	70,00%	30%
C	25,000	37,500	50,000	c_1	60,00%	40%
D	25,000	31,250	37,500	d_2	55,00%	45%
E	31,250	34,375	37,500	e_2	51,00%	49%
F	34,375	35,938	37,500	Indiferente		

A próxima etapa do método consiste em determinar as probabilidades dos intervalos bayesianos a partir de uma série de valores que irá representar a curva característica da opinião do especialista.

As probabilidades dos intervalos bayesianos são determinadas em função das sucessivas divisões e das probabilidades estimadas pelos especialistas na etapa anterior, quando este for o aplicável. Assim, na divisão do intervalo inicial **A**, dado que não há divisões anteriores, os valores das probabilidades dos subintervalos são dados diretamente pelos valores obtidos no processo de elicitación, isto é 95% para a_1 e 5% para a_2 . Na subdivisão de a_1 são gerados dois novos valores, $P(x_{b_{1'}})$ e $P(x_{b_{2'}})$, que representam as probabilidades dos intervalos bayesianos b_1 e b_2 . Estes intervalos devem satisfazer a igualdade apresentada na Figura 2.6

Figura 2.6 – Igualdade para determinação dos intervalos bayesianos

Assim, obtêm-se os valores de 28,50% e 66,50% para $P(x_{b_{1'}})$ e $P(x_{b_{2'}})$ respectivamente. Na seleção seguinte do especialista, o subintervalo b_2 é dividido ao meio gerando dois novos intervalos bayesianos, dados por c_1 e c_2 . Similarmente ao subintervalo a_1 aplica-se a Eq. (2.6) e obtêm-se os valores de 39,90% e 26,60% para $P(x_{c_{1'}})$ e $P(x_{c_{2'}})$, respectivamente.

$$P(x_{b_{1'}}) + \frac{\frac{P(x_{c_1}) \times P(x_{b_{2'}})}{P(x_{c_{1'}})} + \frac{P(x_{b_{2'}}) \times P(x_{c_2})}{P(x_{c_{2'}})}}{P(x_{b_{2'}})} = 95\% \quad (2.6)$$

Novos subintervalos são subdivididos de acordo com as preferências do especialista, gerando assim novas probabilidades para os intervalos bayesianos. A Figura 2.7 apresenta a geração dos intervalos bayesianos em função das subdivisões dos intervalos de **A** a **F** onde, na última divisão, é possível visualizar os intervalos bayesianos de menor amplitude. Estes intervalos irão compor a distribuição de probabilidades subjacente às incertezas do especialista, apresentada na Figura 2.8.

Figura 2.7 – Intervalos bayesianos de acordo com as preferências do especialista

Figura 2.8 – Distribuição de probabilidades subjacente às incertezas do especialista

2.3. COMPARAÇÃO AOS PARES

É um processo no qual os especialistas avaliam os elementos sob análise (alternativas, eventos, cenários ou critérios) aos pares. Os pares são subconjuntos formados pelos elementos que se quer avaliar. Cada subconjunto é avaliado individualmente onde o especialista faz a escolha de um dos elementos a partir de suas preferências. Ao final, obtém-se um conjunto de dados que permite a classificação dos elementos de acordo com a ordem de preferência. Uma das vantagens reside no fato que ao comparar os elementos aos pares, o questionamento torna-se mais simples e mais fácil de ser conduzido, permitindo ao especialista apresentar suas informações de forma mais precisa. Por outro lado, a aplicação requer um maior período de tempo.

Alguns métodos de comparação aos pares permitem a verificação da consistência matemática dos dados elicitados. Um exemplo é o processo analítico hierárquico que será discutido em detalhes na Seção 2.3.1. Outros métodos são mais simples consideram apenas as preferências de um objeto sobre o outro. Veremos um exemplo na Seção 2.3.2.

2.3.1. Processo Analítico Hierárquico

O processo analítico hierárquico, também conhecido como *Analytical Hierarchy Process* (AHP) foi desenvolvido por Saaty em 1975 (SAATY, 1987) como um método de

auxílio à tomada de decisão. O objetivo do método é a avaliação de dois ou mais elementos (eventos, cenários, critérios e/ou alternativas) tomados aos pares, podendo ser aplicado de forma qualitativa ou quantitativa a partir de uma escala definida previamente. A essência do método consiste inicialmente em estruturar o problema através de uma rede ou hierarquia, estabelecendo suas relações através de uma comparação aos pares. A Figura 2.9, adaptada de Marins; Souza e Barros (2009), apresenta um exemplo de estruturação do problema, onde são definidos os objetivos, os critérios/subcritérios de avaliação e possíveis a_m alternativas.

Figura 2.9 – Estruturação da rede hierárquica no AHP
Fonte: Adaptado de Marins, Souza e Barros (2009)

A partir da estruturação, do problema avaliam-se os critérios, subcritérios e alternativas por meio de comparações aos pares onde os resultados são apresentados por matrizes quadradas recíprocas positivas, isto é $a_{ij} > 0$ e $a_{ji} = 1/a_{ij}$ para $i, j = 1, \dots, n$.

Uma das maneiras mais simples de se obter este comparativo é montar uma matriz quadrada A , representando cada elemento a_{ij} como sendo um valor que representa o grau de importância que a opção i apresenta sobre a opção j . As opções podem ser representadas por critérios, subcritérios ou alternativas, conforme a estruturação hierárquica do problema. Para quantificar as comparações em termos numéricos, Saaty (1987) propôs o uso da escala fundamental que permite a transformação de algumas variáveis linguísticas em valores numéricos, conforme apresentado na Tabela 2.3. Nesta tabela é possível comparar os elementos em termos linguísticos e atribuir, a cada comparativo, valores numéricos inteiros, variando de 1 a 9. Quando os elementos apresentam o mesmo grau de importância ou preferência, atribui-se um valor unitário ao comparativo, significando que os dois elementos apresentam a mesma contribuição ou grau de importância com relação ao critério considerado. No momento em que pequenas diferenças são identificadas entre os elementos

sob análise, aumenta-se o grau de preferência de um dos elementos podendo ser atribuído a este até o valor máximo de 9, representando os casos em que um dos elementos é extremamente preferencial em relação ao outro.

Tabela 2.3 – Escala fundamental de Saaty

Grau de Importância ou de preferência	Definição	Explicação
1	Igual importância/preferência	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Moderada importância/preferência de um sobre o outro.	A experiência e o julgamento indicam preferências de uma atividade sobre a outra.
5	Essencial ou muito forte importância/preferência	Uma atividade é fortemente preferencial sobre a outra e apresenta a relação de dominância.
7	Importância/preferência muito forte	Uma atividade é preferencialmente mais forte que a outra.
9	Extrema importância/preferência	Uma evidência preferencial de uma atividade sobre a outra é altamente possível
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes	

Fonte: Adaptada de Saaty (1987)

O AHP pode ser aplicado tanto em processos de elicitação baseado em escolhas, como no auxílio de processos de calibração de especialistas, que será discutido na Seção 3. No auxílio na calibração de especialistas, o AHP pode ser utilizado na determinação dos pesos dos especialistas a partir da comparação de suas habilidades e experiências adquiridas. A Figura 2.10 apresenta um exemplo de matriz comparativa que compara as habilidades de 7 especialistas tomados aos pares, levando-se em consideração suas habilidades e experiências.

		Especialistas						
		1	2	3	4	5	6	7
Especialistas	1	1,00	5,00	2,00	2,00	4,00	2,70	2,00
	2	0,20	1,00	1,80	1,70	1,00	0,80	0,50
	3	0,50	0,56	1,00	1,30	1,50	2,90	0,80
	4	0,50	0,59	0,77	1,00	1,20	3,00	0,95
	5	0,25	1,00	0,67	0,83	1,00	1,50	1,60
	6	0,37	1,25	0,34	0,33	0,67	1,00	1,40
	7	0,50	2,00	1,25	1,05	0,63	0,71	1,00

Figura 2.10 – Matriz de comparação dos pesos dos especialistas

Nesta matriz, de elaboração própria, buscou-se quantificar as habilidades dos especialistas a partir da a escala fundamental de Saaty (1987). Cada elemento da matriz representa o grau de importância que um especialista **i** apresenta sobre o especialista **j**. Desta forma é possível afirmar que o especialista 1 apresenta um grau muito forte em relação ao especialista 2, mas uma moderada importância em relação ao especialista 7. Isto deve-se ao fato do especialista 1 apresentar uma experiência profissional superior em relação ao especialista 2 e um conhecimento teórico ligeiramente superior ao especialista 7. Por outro lado quando comparamos o especialista 2 com o especialista 1 obtemos um valor inferior a 1, que mesmo não estando na escala de Saaty (1987), representa a superioridade de 1 sobre 2. Esta conclusão é obtida a partir do cálculo do inverso de 0,2, que para este caso resultaria no valor de 5. Para os demais especialistas o mesmo critério é adotado, onde o valor do conhecimento e experiência de um especialista sobre o outro é caracterizado por um elemento a_{ij} .

A obtenção dos pesos dos especialistas, em relação ao grupo, é obtida a partir da normalização da matriz comparativa. Este processo pode ser realizado de duas maneiras distintas. A primeira, consiste em elevar a matriz comparativa ao quadrado e somar os elementos de cada linha resultante de forma a obter uma matriz apresentando **i** linhas e apenas uma única coluna. A normalização desta matriz, que é obtida a partir da divisão de cada elemento a_{ij} pelo somatório de todos elementos, resulta em uma nova matriz que define o peso de cada especialista. Esta matriz será definida como matriz peso, onde o elemento $a_{1,1}$ representa o peso do especialista 1 (W1), $a_{2,1}$ do especialista 2 (W2) e assim sucessivamente. A Figura 2.11 mostra em detalhes estas matrizes.

		Especialistas									Σ Linha	Matriz Peso										
		1	2	3	4	5	6	7	2													
Especialistas	1	1,00	5,00	2,00	2,00	4,00	2,70	2,00	=	7,00	23,66	20,64	21,44	21,45	28,63	20,18	→	143,00	0,30	→ W1		
	2	0,20	1,00	1,80	1,70	1,00	0,80	0,50		2,95	7,00	6,88	7,77	8,39	14,32	7,18		54,47			0,12	→ W2
	3	0,50	0,56	1,00	1,30	1,50	2,90	0,80		3,61	11,10	7,00	7,60	9,55	14,32	10,57		63,75			0,14	→ W3
	4	0,50	0,59	0,77	1,00	1,20	3,00	0,95		3,39	10,95	6,62	7,00	8,74	12,53	9,93		59,16			0,13	→ W4
	5	0,25	1,00	0,67	0,83	1,00	1,50	1,60		2,81	9,19	6,79	6,92	7,00	10,05	7,63		50,38			0,11	→ W5
	6	0,37	1,25	0,34	0,33	0,67	1,00	1,40		2,20	8,21	6,13	6,01	5,86	7,00	5,82		41,23			0,09	→ W6
	7	0,50	2,00	1,25	1,05	0,63	0,71	1,00		2,97	9,33	8,57	8,89	8,86	12,10	7,00		57,73			0,12	→ W7
										Σ	469,70	1,00										

Figura 2.11 – Peso dos especialistas obtido a partir da potência da matriz de comparativa

A segunda maneira consiste em normalizar a matriz comparativa a partir da divisão de cada elemento da matriz elicitada pela soma de todos os elementos da respectiva coluna. A soma dos elementos de cada linha da matriz normalizada dividido pelo número de

especialistas dá origem a matriz peso onde o elemento $a_{1,1}$ representa o peso do especialista 1 (W1), $a_{2,1}$ do especialista 2(W2) e assim sucessivamente. A Figura 2.12 mostra este procedimento.

OPÇÃO 2 - NORMALIZANDO A TABELA

Especialistas

1234567

1

1,005,002,002,004,002,702,00

2

0,201,001,801,701,000,800,50

3

0,500,561,001,301,502,900,80

4

0,500,590,771,001,203,000,95

5

0,251,000,670,831,001,501,60

6

0,371,250,340,330,671,001,40

7

0,502,001,251,050,630,711,00

Σ col

3,3211,47,838,229,9912,68,25

Matriz Peso

0,300,440,260,240,400,210,24

0,060,090,230,210,100,060,06

0,150,050,130,160,150,230,10

0,150,050,100,120,120,240,12

0,080,090,090,100,100,120,19

0,110,110,040,040,070,080,17

0,150,180,160,130,060,060,12

Σ

1,00

→ W1

→ W2

→ W3

→ W4

→ W5

→ W6

→ W7

Figura 2.12 – Peso dos especialistas obtidos pela normalização da matriz comparativa

Uma das vantagens da Comparação aos pares é a possibilidade de verificar a consistência dos resultados obtidos, garantindo assim uma boa coerência matemática. Esta verificação é realizada através do cálculo do índice de consistência (C.I.) definido pela Eq. (2.7) onde n representa o número de critérios, subcritérios ou alternativas; neste caso representado pelo número de especialistas, e λ_{max} representa o autovalor máximo.

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2.7)$$

O autovalor (λ) é definido como um número real que satisfaça a igualdade $T(v) = \lambda \times v$, onde $T(v)$ representada a transformação linear do vetor não nulo (v). O autovalor máximo pode ser obtido conforme mostra a Eq. (2.8).

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n a_{i,1} \times W_1 + \sum_{i=1}^n a_{i,2} \times W_2 + \dots + \sum_{i=1}^n a_{i,n} \times W_n \quad (2.8)$$

A partir de $C.I. = 0,104$ é possível calcular o valor da taxa de consistência $C.R$ a partir da Eq. (2.9).

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I} \quad (2.9)$$

Nesta equação $R.I$ representa o índice aleatório, que é um valor tabelado que varia em função do número de critérios, subcritérios ou alternativas, aqui representadas pelo número de especialistas. A Tabela 2.4 apresenta os valores de $R.I$ desenvolvida por Saaty (1987) a partir de uma amostra de 500 números, gerados a partir de matrizes recíprocas aleatórias usando escalas de 1/9, 1/8, 1/7, ..., 1, ..., 8, 9 com objetivo de verificar se $C.R$ é inferior ou igual a 0,1. Apesar da nomenclatura utilizada por Saaty (1987) o valor de $C.R$ deve ser interpretado por uma inconsistência desejável do processo já que dentro do conhecimento podem surgir novas descobertas que não seriam admitidas caso o processo fosse totalmente consistente. Esta condição está diretamente ligada à definição de conhecimento, apresentando na Seção 1.1.2, onde foi visto que dentro do EIK há verdades que não estão dentro de KI, sendo originárias da evolução do conhecimento. Desta forma o autor faz uma ressalva sugerindo também que o valor de $C.R$ não apresente valores extremamente baixos como 1% ou 0,1%.

Tabela 2.4 – Valores do índice aleatório										
n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R.I.	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,46	1,49

Fonte: Adaptada de Saaty (1987)

Assim, para o exemplo anterior obteve-se um valor de $C.R = 0,079$, indicando assim uma inconsistência dos dados de 7,9%. A Tabela 2.5 apresenta o resumo dos valores obtidos na verificação da consistência da comparação aos pares entre os especialistas.

Tabela 2.5 – Detalhamento dos valores obtidos cálculo na verificação da consistência dos pesos dos especialistas

	Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col 4.	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Totais
Σ col.	3,32	11,39	7,83	8,22	9,99	12,61	8,25	61,62
Peso (W)	0,30	0,12	0,14	0,13	0,11	0,09	0,12	1,00
Σ col. x W	1,02	1,32	1,06	1,03	1,07	1,11	1,01	7,62

2.3.2. Uma exemplificação da comparação aos pares

Conforme discuto na seção anterior, a comparação aos pares permite a comparação de dois objetos a partir das preferências dos especialistas. Uma das características do método AHP é que a comparação passa necessariamente por uma escala de prioridades, onde em alguns casos esta classificação pode não ser estritamente necessária. Ford; Richards e

Hungerford (1998), por exemplo fazem uso da comparação aos pares a partir do modelo de Thurstone, em que não é necessário exprimir o grau de concordância para a resposta. Na pesquisa, os autores buscam utilizar a combinação aos pares na prevenção de acidentes onde, relaciona a redução de acidentes em vagões de carga a partir do uso de refletores adesivos. O objetivo da pesquisa era determinar qual seria o refletor ideal que possibilitasse a redução de colisões entre veículos e vagões de carga durante o período noturno. Estes acidentes, em geral, ocorrem nos trechos de cruzamentos onde, devido a uma sinalização inadequada ou mesmo um descuido do motorista, ocorre a colisão entre os vagões com e os veículos. Segundo os autores, a falta de sinalização ou inadequabilidade da mesma pode dificultar a visibilidade desses vagões de carga durante o período noturno podendo causar colisões entre vagões de carga e veículos automotores.

Assim, os autores fazem o uso da comparação aos pares como uma forma de ordenar os 11 melhores adesivos refletores para vagões de carga, visando reduzir os acidentes entre vagões de carga e veículos. Nesta pesquisa, os autores buscaram adesivos refletivos experimentais considerando sua forma geométrica, tamanho, cor e disposição no vagão. Assim, os especialistas foram elicitados a respeito de duas opções de adesivos refletores, aquele que apresentasse a melhor visibilidade para os motoristas, segundo suas preferências pessoais. Exatamente 55 pares foram formados a partir dos 11 tipos de refletores adesivos disponíveis, sendo avaliados pelos especialistas através de questionários de múltipla escolha. Em cada questionário, com as devidas instruções, as questões foram apresentadas na forma de pares de fotografias de modelos em escala, onde o especialista iria assinar o refletor com melhor visibilidade. A Figura 2.13 apresenta alguns pares de refletores avaliados.

Figura 2.13 – Alguns pares de refletores avaliados pelos especialistas
Fonte: Ford; Richards e Hungerford (1998)

Ao término da avaliação, Ford; Richards e Hungerford (1998) concluíram a pesquisa apresentando os 11 melhores refletores adesivos e confrontando os resultados em um segundo processo de elicitación baseado em uma ordenação simples. Segundo o autor a aplicação de técnicas combinadas aumenta a validade e credibilidade dos resultados, além de produzir um maior número de informações. Assim, no processo de ordenação simples os 11 modelos foram apresentados aos especialistas para serem classificados de acordo com sua efetividade, sendo atribuído o número 1 para o mais efetivo e o número 11 para o menos efetivo. Neste segundo processo uma única divergência ocorreu na 8ª e 9ª posições que, na comparação aos pares, eram representadas pela 9ª e 8ª posição, respectivamente. Os resumos dos resultados obtidos em ambos os processos estão apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Resultados obtidos na elicitación de especialistas na seleção dos melhores refletores de segurança

Ordem	Ordenação simples	Comparação aos pares
1º	#8, Yellow Fence	#8, Yellow Fence
2º	#3, Yellow Outline	#3, Yellow Outline
3º	#6, Yellow Dash	#6, Yellow Dash
4º	#1, Red / White Crossing Gate	#1, Red / White Crossing Gate
5º	#5, Red / White Diamonds in Bars	#5, Red / White Diamonds in Bars
6º	#10, Red / White Highway Truck	#10, Red / White Highway Truck
7º	#2, Red-White Sawtooth	#2, Red / White Sawtooth
8º	#4, Red-White Chevrons	#9, Red / White Field Test
9º	#9, Red / White Field Test	#4, Red / White Chevrons
10º	#7, Red Crossbucks	#7, Red Crossbucks
11º	#11, Standard Car	#11, Standard Car

Fonte: Ford; Richards e Hungerford (1998)

2.4. ESTIMATIVAS PARAMÉTRICAS

Esta técnica foi desenvolvida visando aproximar a opinião de especialista a uma dada distribuição de probabilidades. Inicialmente, deve-se assumir qualquer distribuição que seja definida.

Entretanto, Cooke (1991, p.124) sugere que se adote inicialmente a distribuição lognormal. Em geral, a justificativa para a escolha da função lognormal esta relacionada à representação das taxas de falha. Estas apresentam uma grande variabilidade ou ruído

multiplicativo, sendo, em geral, na forma de potências de dez. Nesta condição, a função lognormal contribui para representação igualmente dos dados, levando em consideração a sua grande sensibilidade nas caudas. Apostolakis et al. (1980) apresentam a importância desta distribuição quando os dados são oriundos de plantas com diferentes características, justificando assim seu emprego nos bancos de dados.

Segundo Cooke (1991, p.124), a European Space Agency desenvolveu o método a partir da aplicação de dois passos conforme segue:

- 1) Estimar a mediana “m” da frequência de falha do problema em questão. Segundo Peterson e Miller (1964), a escolha pelo valor mediano reflete sua precisão em relação à média que, em geral, apresenta um certo enviesamento;
- 2) Estimar a probabilidade “r” ($0 < r < 1$) de que o verdadeiro valor exceda 10 vezes o valor mediano. Caso a estimativa da mediana seja superior a 0,1, o especialista será questionado e simplesmente informará o limite superior com nível de confiança de 95%. Os valores de “m” e “r” podem ser utilizados para calcular os limites do intervalo de confiança de 95% e 5% através de $m/k_{0,95}$ e $m \times k_{0,95}$, onde:

$$k_{0,95} \approx \frac{e^{-0,658}}{z_{1-r}} \quad (2.10)$$

Para a determinação z_{1-r} , define-se o $(1 - r)$ -ésimo quantil da distribuição normal padrão. Esta distribuição padrão considera como parâmetros média igual a zero ($\mu=0$) e desvio padrão igual a 1 ($\sigma = 1$).

O exemplo a seguir, de própria autoria, mostra como a aplicação da técnica pode ser realizada para a determinação da frequência de falhas de um material a partir da elicitación de especialistas. Deseja-se estimar a frequência de falha de um cabo de aço, com base na opinião de especialista, considerando um nível de confiança de 90% para a mediana. O especialista é elicitado e atribui à probabilidade de falha o valor mediano de 0,001 falhas/ano com probabilidade de 1% desta probabilidade superar em 10 vezes o valor da mediana estimada.

A determinação dos limites de confiança é obtida a partir do método paramétrico onde se determinam os valores de z_{1-r} e $k_{0,95}$. O valor de z_{1-r} é obtido da tabela da distribuição normal padrão, onde se localiza qual o valor da função acumulada para $z_{0,99}$, obtendo o valor de 2,3263. Assim, é possível determinar o valor de $k_{0,95}$, conforme segue:

$$k_{0,95} \approx \frac{e^{-0,658}}{z_{1-0,01}} \Rightarrow k_{0,95} = \frac{0,5179}{2,3263} = 0,2226 \quad (2.11)$$

Assim, o intervalo de confiança de 90% é dado por:

$$\begin{aligned} \frac{m}{k_{0,95}} \leq m \leq m \times k_{0,95} &\Rightarrow 0,0001 \times 0,2226 \leq m \leq \frac{0,001}{0,2226} \\ &\Rightarrow 2,23 \times 10^{-4} \leq m \leq 4,49 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (2.12)$$

A interpretação dos valores obtidos sugere que a frequência de falha do cabo de aço encontra-se no intervalo de $2,23 \times 10^{-4} \leq m \leq 4,49 \times 10^{-3}$ no intervalo de 5% e 95% de confiança.

A técnicas paramétricas encerram a discussão das técnicas de elicitação de especialistas onde, neste capítulo, foram sumarizadas as técnicas a partir de suas particularidades. Os métodos ditos diretos apresentam a vantagem de apresentarem resultados praticamente imediatos, já que não demandam cálculos adicionais. Dentre esses foram discutidos o método Delphi e a Técnica Nominal de Grupo onde, em ambos, as ideias são geradas individualmente pelos especialistas. Enquanto o método Delphi considera o anonimato, na técnica NGT há uma familiarização dos especialistas e a geração de ideias parte do conceito *robin round*. Ambos, podem trabalhar diversos contextos podendo ser desde estimativa numérica de probabilidades como atender na escolha de padrões visuais, como exemplificado nos padrões de sinalização estudados por Ford; Richards e Hungerford (1998). A técnica NGT torna-se uma pouco mais flexível neste contexto, já que a etapa de clarificação facilita a percepção dos especialistas a partir das ideias geradas por outros especialistas. No método Delphi todo feedback esta restrito ao tomador de decisão e, portanto, nem sempre é possível saber porque o especialista apontou determinada escolha. Além destes, foi discutido a análise de cenários que foca em eventos futuros e nós de decisão, visando obter as melhores alternativas. Esta técnica é bastante importante em estudos de análise de risco pois permite trabalhar com sequências de eventos futuros de forma a auxiliar os impactos e custos associados a um determinado cenário acidental.

Nos casos onde há um grande número de informações, e estas serão ordenadas em função de um critério específico, existe a possibilidade de simplificar o processo da comparação aos pares. Esta apresenta a característica de segmentar as comparações de forma

a facilitar a escolha pelo especialista, através da escolha de uma opção entre duas. Por ser uma técnica indireta o resultado é obtido somente a partir de todas as comparações, o que pode demandar um tempo significativo para aplicação, mas pode trazer vantagens na verificação de inconsistências. Isto deve-se ao fato que, em alguns casos como AHP, é possível checar a consistência das respostas e verificar os resultados através de matrizes recíprocas. Utilizando um conceito bastante similar foi apresentado o método de Firmino e Drogue que compara pares de intervalos numéricos a serem selecionados pelos especialistas. A vantagem aqui é que este método mais flexível, permitindo que o especialista apresente uma credibilidade em relação a sua escolha. Essa característica confere ao método a possibilidade de se determinar a distribuição de probabilidades ao invés de uma simples ordenação, como visto na comparação aos pares. A desvantagem é que o método só aceita valores de probabilidades não sendo adequado para casos não numéricos, como no estudo de sinalização de Ford; Richards e Hungerford (1998). Além desta desvantagem o método de Firmino pode ser bastante exaustivo se os valores de probabilidades forem muito baixos, pois neste caso seria gerado um grande número de subdivisões, considerando os intervalos iniciais de 0 a 50% e de 50% a 100%.

Além do método de Firmino e Drogue discutiram-se as taxas de apostas, que não apresentam muitas aplicações práticas, mas são simples de ser aplicadas. Por gerar um único resultado, a estimativa das probabilidades ficam bem limitadas, já que neste caso não é apresentado uma distribuição de probabilidades. Além desta característica, a esta técnica também esta limitada a estimativa de valores numéricos.

Por fim, discutiu-se a análise paramétrica uma técnica indireta que permite definir a distribuição de probabilidades a partir da mediana. De rápida aplicação, a técnica permite indiretamente inferir valores de probabilidade a partir da mediana. Sua desvantagem é que esta técnica esta limitada a valores numéricos.

Independente da técnica a ser aplicada, a escolha da deve estar condicionada facilidade de aplicação da técnica, os resultados esperados e o custo envolvido. Por exemplo, se existe uma dificuldade de reunir os especialistas, talvez a técnica NGT não seja adequada pois agregaria talvez um custo desnecessário e que talvez não justificasse a sua aplicação. Da mesma forma, se o enfoque do problema não for numérico, muitas técnicas poderiam ser descartadas reduzindo por exemplo à NGT ou comparação aos pares. Há casos onde a aplicação de técnicas múltiplas pode ser vantajosa, garantindo assim um maior número de resultados e evitando as principais limitações de cada técnica. Em qualquer que seja o caso o analista deve fazer a escolha tendo em vista as limitações que podem ocorrer no processo,

além das etapas que sucederam o processo de elicitação, já que os resultados obtidos por mais de um especialista deverão ser combinados e agregados convenientemente. Estas etapas serão discutidas no Capítulo 4.

Encerra-se assim este capítulo por aqui onde foram discutidos os principais métodos e técnicas de elicitação. No próximo capítulo será discutido a verificação do alinhamento entre os especialistas, uma etapa recomendada para checar a convergência das opiniões.

3. ALINHAMENTO ENTRE OS ESPECIALISTAS

Em geral, durante a etapa de elicitación dos especialistas, diferentes opiniões são geradas podendo ocorrer uma boa convergência entre os especialistas, ou mesmo uma divergência que dificulte a etapa de agregação das opiniões. Alguns estudos defendem a ideia que a divergência de opiniões deve-se principalmente à heterogeneidade do grupo de especialistas, sendo observada uma diferença de opiniões menos expressiva em grupos homogêneos (EMRE et al., 2015). Estudos mais recentes têm mostrado que nem sempre a homogeneidade ou heterogeneidade do grupo interfere na distância entre as opiniões. Stålhane (2017), por exemplo, faz uma comparação das opiniões elicitadas entre especialistas e um grupo de leigos composto por estudantes universitários em um experimento prático sobre a percepção de risco. A conclusão obtida nos experimentos realizados é clara: a avaliação do nível de risco entre o grupo heterogêneo foi bem alinhada, compartilhando assim suas opiniões. Os autores concluíram ainda que não há justificativa plausível para a divisão entre especialistas e não especialistas quando o objetivo reside na avaliação subjetiva do risco.

Entretanto, nem sempre o objeto de estudo está na avaliação subjetiva de risco e não são raros os casos onde existe uma divergência significativa das opiniões. Nestes casos, as informações elicitadas devem ser tratadas antes da etapa da agregação. Em geral, estas divergências são avaliadas em um contexto diferente, iniciando assim um processo de verificação do alinhamento entre os especialistas, onde se busca aproximar as opiniões elicitadas através do consenso, evitando assim grandes inconsistências que possam comprometer a análise. Estas divergências podem ter origem na formação do especialista ou mesmo fazer parte das heurísticas do indivíduo.

Mazzuchi, Linzey e Bruning (2008) apresentam um estudo sobre as falhas e os riscos presentes em leitos de cabos elétricos de aeronaves, onde divergências significativas são encontradas durante a etapa de elicitación dos especialistas. Um dos métodos utilizados pelos autores na busca do alinhamento é o uso do coeficiente de correlação de Kendall que será apresentado, discutido e exemplificado na Seção 3.1.

Além do coeficiente de Kendall, existem outras formas de se verificar o alinhamento dos especialistas, principalmente nos casos em que as respostas são dadas em termos linguísticos. Nestes casos, existe uma dificuldade na aplicação dos métodos tradicionais, sendo recomendado o uso da função similaridade (HSI; CHEN, 1996) que pode trabalhar em conjunto com o método das distâncias (LU; LAN; WANG, 2006). Visando um melhor

entendimento, estes assuntos serão abordados convenientemente na Seção 4.3, onde será discutido em detalhes a lógica difusa.

3.1. TESTE ESTATÍSTICO W

O teste estatístico W ou coeficiente de concordância de Kendall foi apresentado em 1939, por Kendall e Smith (1939), com o objetivo de avaliar o grau de concordância entre as classificações apresentadas por um grupo de avaliadores (considerados especialistas) para um conjunto de alternativas. Diferentemente de outros coeficientes, como o coeficiente de Pearson, este permite lidar com dependências não lineares o que o torna bastante conveniente na verificação do alinhamento entre especialistas. Esta classificação deve ser realizada em função de um critério específico e pré-estabelecido.

A edição revisada do guia *Formal Safety Assessment* (FSA), divulgada pela IMO (2013), sugere o cálculo do coeficiente de Kendall durante a execução da etapa da identificação de perigos. Nesta etapa, os perigos são identificados, classificados e ordenados em função do nível de risco associado. Modica (2009), por exemplo, seguindo as recomendações do FSA, faz uma avaliação dos riscos associados às operações de docagens de navios petroleiros a partir da opinião de especialistas. Uma operação de docagem de um navio envolve a colocação do navio em um dique seco, retirando-o da água para a realização da manutenção tanto da estrutura do seu casco quanto de seus sistemas a bordo, e posterior retorno à operação. O levantamento dos riscos envolvidos, possibilitou o ordenamento e classificação dos riscos por cada especialista considerando, como critério para classificação, o grau de severidade de cada risco. Com o objetivo de verificar o alinhamento entre os especialistas, o autor propôs o cálculo do coeficiente de concordância ou coeficiente de Kendall definido conforme a Eq. (3.1) de autoria de Kendall e Smith (1939).

$$W = \frac{12 \times S}{m^2 \times (n^3 - n)} \quad (3.1)$$

onde,

W Coeficiente de concordância

S Soma dos desvios quadráticos da somatória das posições do rank

m Número de avaliadores

n Número de objetos, cenários ou alternativas

A soma dos desvios quadráticos do somatório das posições do rank (S) é obtida a partir do R_i e $\bar{R}$ conforme mostram as Eqs. (3.2), (3.3) e (3.4).

$$S = \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 \quad (3.2)$$

$$R_i = \sum_{j=1}^m R_{i,j} \quad (3.3)$$

$$\bar{R} = \frac{\sum R_i}{n} \quad (3.4)$$

onde,

R_{ij} Rank do objeto, alternativa de projeto ou cenário i avaliado a partir da opinião do avaliador j

R_i Rank do objeto, alternativa de projeto ou cenário i a partir da opinião de todos avaliadores

$\bar{R}$ Valor médio de R_i

Na literatura, também é possível encontrar o cálculo de W conforme mostra a Eq. (3.5) Esta fórmula, proposta pela IMO (2013), foi obtida a partir de uma manipulação algébrica da formulação original:

$$W = \frac{12 \times \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m R_{ij} - \frac{1}{2} m(n+1) \right]^2}{m^2 \times (n^3 - n)} \quad (3.5)$$

Considerando uma aplicação adequada do método, o coeficiente W não deve superar o valor máximo de 1 ou apresentar valores negativos, ou seja, $W: \Omega \rightarrow [0,1]$. Se o valor de W estiver fora deste intervalo é possível que exista uma insuficiência de dados ou mesmo que estes não são adequados para aplicação deste método. Desta forma quando o valor de W se aproxima de 1, maior será a concordância e vice-versa. Segundo IMO (2013), valores de W acima de 0,7 indicam uma boa concordância. Outras faixas de valores podem sinalizar uma média ou pobre concordância conforme mostra Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Concordância em função do coeficiente de Kendall	
Coeficiente de Concordância	Concordância
> 0.7	Boa
0.5 – 0.7	Média
< 0.5	Pobre

Fonte: IMO (2013)

O exemplo a seguir apresenta um estudo onde 5 especialistas avaliaram a ordem das possíveis causas de acidentes de comboios hidroviários na HTP. Os dados foram obtidos a partir dos estudos de SAITO et al. (2015), onde classificou-se os acidentes em uma escala de 0 a 5, conforme mostra a Tabela 3.2. Os especialistas avaliaram cada item proposto, atribuindo o número 1 para a causa mais provável e número 5 para a menos provável.

Tabela 3.2 – Classificação das causas de acidentes hidroviários segundo os especialistas					
Causa	Especialistas / Avaliadores				
	E1	E2	E3	E4	E5
Erro humano	5	2	1	1	1
Falha no sistema de propulsão	1	3	3	3	2
Falha no sistema de governo	2	4	4	4	3
Falha no sistema elétrico	3	5	2	2	4
Falha em outro sistema	4	6	5	5	5
Fator organizacional	6	1	6	6	6

O cálculo do alinhamento entre os especialistas, complementa o trabalho citado, avaliando efetivamente o distanciamento entre as opiniões. Por impor obrigatoriamente uma ordenação, a concordância avaliada a partir do coeficiente de Kendall torna-se bastante adequada para este caso. Isto deve-se ao fato de que todos os itens foram classificados em função de sua probabilidade de ocorrência. Assim, na primeira etapa são obtidos o rank do item avaliado considerando a opinião de todos especialistas, isto é R_i . A Eq. (3.6) exemplifica a obtenção de R_1 , isto é a soma da posição do rank de cada especialista em relação ao erro humano:

$$R_1 = \sum_{j=1}^5 R_{1,j} = R_{1,1} + R_{1,2} + R_{1,3} + R_{1,4} + R_{1,5} = 5 + 2 + 1 + 1 + 1 = 10 \quad (3.6)$$

Os demais valores de $R_2, R_3, \dots, R_6$ são obtidos da mesma maneira e serão utilizados para a obtenção de $\bar{R}$, isto é o valor médio de R_i . A Eq. (3.7) mostra a obtenção de $\bar{R}$ a partir dos valores de R_i calculados anteriormente

$$\begin{aligned}\bar{R} &= \frac{\sum R_i}{6} = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6}{6} \\ &= \frac{10 + 12 + 17 + 16 + 25 + 25}{6} = 17,5\end{aligned}\tag{3.7}$$

A partir de $\bar{R}$ obtém-se a soma dos desvios quadráticos do somatório das posições do rank conforme apresenta a Eq. (3.8).

$$\begin{aligned}S &= \sum_{i=1}^6 (R_i - \bar{R})^2 = (10 - 21)^2 + (12 - 21)^2 + (17 - 21)^2 + (16 - 21)^2 \\ &\quad + (25 - 21)^2 + (25 - 21)^2 = 201,5\end{aligned}\tag{3.8}$$

Finalmente o valor de W é obtido a partir do valor de S conforme mostra a Eq. (3.9)

$$W = \frac{12 \times 201,5}{5^2 \times (6^3 - 6)} = 0,46\tag{3.9}$$

Ao se avaliar o nível de concordância entre os 5 especialistas, baseado no coeficiente de Kendall, é possível observar que ocorreu um alinhamento insatisfatório, com $W = 0,46$. Casos como este não são raros; uma das opções seria reavaliar as respostas obtendo mais informações dos especialistas (HSI; CHEN, 1996) ou mesmo excluir alguns especialistas (MAZZUCHI; LINZEY; BRUNING, 2008). É possível observar que apenas com a exclusão do especialista E2 o coeficiente de Kendall torna-se satisfatório ($W = 0,70$), sinalizando um bom alinhamento entre os demais especialistas.

Apesar do cálculo do coeficiente de Kendall ser relativamente simples, é importante destacar que este coeficiente só produz bons resultados caso seja aplicado de forma criteriosa. Por exemplo, a Tabela 3.3 apresenta uma classificação de cenários realizada por 6 especialistas onde cada um é convidado a classificar os piores e melhores cenários. Este é um cenário hipotético de própria autoria onde, por regra, o rank 1 representa o pior cenário e o

rank 5 representa o melhor cenário. Os especialistas fazem seus julgamentos, onde o especialista E6 apresenta dúvidas sobre o melhor e o pior cenários, atribuindo o mesmo rank 1 para os cenários 1 e 2 e o rank 5 para os cenários 4 e 5. Neste caso, o especialista não consegue distinguir os cenários 1 e 2 e os cenários 4 e 5.

Tabela 3.3 – Especialista com incerteza entre o melhor e o pior cenários

W = 1,07	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
E1	1	2	3	4	5
E2	1	2	3	4	5
E3	1	2	3	4	5
E4	1	2	3	4	5
E5	1	2	3	4	5
E6	1	1	3	5	5

Neste caso o especialista E6 tem certeza que os piores cenários são os de números 1 e 2, mas não sabe responder qual deles é o pior. O mesmo ocorre para o melhor cenário, na qual o especialista esta na dúvida entre os cenários 4 e 5. A única certeza do especialista é que o cenário 3 não é o melhor nem o pior. A incerteza do especialista faz com que o cálculo do coeficiente de Kendall fique superestimado, apresentado um valor irreal de $W=1,07$. Embora esteja bastante evidente esta inconsistência para o caso específico, caso o cálculo englobe um maior número de cenários ou mesmo de especialistas, esta inconsistência pode passar despercebida, fazendo com que o valor de W seja menor que 1 e fique superestimado. A mesma situação poderia ocorrer caso o especialista tivesse dúvida no pior cenário ou no cenário menos crítico. No caso de incerteza sobre o pior cenário, o especialista não consegue identificar qual seria o pior cenário, atribuindo a primeira posição a dois cenários distintos, que ele considera como sendo os piores. Este caso esta apresentando na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Especialista E6 com incerteza no pior cenário

W = 1,04	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
E1	1	2	3	4	5
E2	1	2	3	4	5
E3	1	2	3	4	5
E4	1	2	3	4	5
E5	1	2	3	4	5
E6	1	1	3	4	5

No caso da incerteza sobre o cenário menos crítico, o mesmo raciocínio é válido e está representado na Tabela 3.5, onde um dos especialistas atribui a quinta posição para dois cenários distintos. Tanto no caso da incerteza sobre o pior cenário ou sobre o cenário menos crítico o cálculo do coeficiente de Kendall resulta no mesmo valor ($W=1,04$).

Tabela 3.5 – Especialista com incerteza no cenário menos crítico					
$W = 1,04$	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
E1	1	2	3	4	5
E2	1	2	3	4	5
E3	1	2	3	4	5
E4	1	2	3	4	5
E5	1	2	3	4	5
E6	1	2	3	5	5

Existem outras situações em que o especialista não consegue classificar os eventos intermediários, apresentando uma indiferença nas suas repostas, como mostra a Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Especialista com incerteza nos cenários intermediários						
$W = 1,02$	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
E1	1	2	3	4	5	6
E2	1	2	3	4	5	6
E3	1	2	3	4	5	6
E4	1	2	3	4	5	6
E5	1	2	3	4	5	6
E6	1	2			5	6

Neste caso o especialista não sabe em que posição se enquadram os cenários 3 e 4, mas tem certeza sobre os cenários 1, 2, 5 e 6. Novamente, o cálculo do coeficiente de Kendall, apresenta-se inconsistente com $W=1,02$. É importante destacar que esta situação é um caso bem particular que pode ocorrer na prática, mas acaba inviabilizando o estudo, tendo em vista que todos os cenários devem apresentar alguma classificação. Assim, como alternativa, o tomador de decisão, neste caso, pode arbitrariamente avaliar as situações onde ambos os cenários apresentam a mesma classificação. Neste caso, teríamos um resultado bastante similar ao apresentado na Tabela 3.4, apresentando coeficiente de Kendall $W=0,99$, independente da classificação arbitrar o cenário 3 e 4 na quarta ou terceira posição.

Assim, é importante que o tomador de decisão aplique o coeficiente de Kendall de maneira criteriosa, avaliando sempre os dados obtidos durante o processo de elicitación ou mesmo faça um planejamento adequado de forma a obter dados suficientes para a avaliação do alinhamento entre os especialistas. Um bom alinhamento facilita a agregação de combinação de opiniões, garantindo assim bons resultados. Quando o alinhamento é insatisfatório há alternativas para contornar estas divergências. Uma das alternativas é a calibração assunto que será discutido no próximo capítulo.

4. AGREGAÇÃO, COMBINAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE OPINIÕES

Este capítulo descreve a calibração, combinação e agregação de opiniões como etapas do processo de elicitación dando-lhe continuidade. O processo de calibração de especialistas consiste em verificar a acurácia das respostas a partir de padrões, permitindo que as opiniões sejam equalizadas de forma a obter melhores resultados e evitar as influências de enviesamento. A partir de uma boa calibração, é possível combinar e agregar as respostas, melhorando assim significativamente os resultados finais. De forma geral, a calibração dos especialistas não está inserida na sequência do processo de elicitación, mas funciona como uma etapa complementar que ajuda nas etapas de agregação e combinação de opiniões. A calibração tem por objetivo minimizar os potenciais vieses, que podem estar embutidos no processo, garantindo assim, o benefício de múltiplas bases de conhecimento. A combinação é uma etapa que sucede a elicitación, onde as opiniões são reunidas com o objetivo de obter um valor que esteja de acordo com todos. Esta pode ser, por exemplo, a média dos valores de probabilidades de falha de um determinado equipamento. Existem diversas maneiras de combinar opiniões, sendo usuais os métodos matemático e os métodos baseados no consenso. Estes serão sumarizados nas seções 4.2 e 4.2.3, respectivamente. Nos métodos matemáticos o mais comum é o uso dos percentis que agrupam as opiniões em faixas de valores. Estes serão discutidos na seção 4.2.2. Além dos percentis, existem os métodos matemáticos baseados na média aritmética ponderada, a média geométrica ponderada, entre outros, que consideram os pesos dos especialistas e são simples de serem aplicados. Tais métodos serão discutidos na seção 4.2.1. Nos casos onde a combinação não é possível ou desejável, podem-se utilizar métodos de agregação. A agregação das opiniões são métodos que permitem agregar diferentes valores, gerando um resultado que pode não estar diretamente relacionado com as opiniões elicítadas. Esta definição fica bastante clara quando o processo de elicitación envolve termos linguísticos como, por exemplo, na quantificação da probabilidade de ocorrência de um determinado evento. Nestes casos, as opiniões são dadas por termos linguísticos como: alta, baixa, moderada, e outros, sendo alcançada a quantificação destes valores a partir da lógica difusa, assunto a ser discutido na Seção 4.3.

4.1. CALIBRAÇÃO DE ESPECIALISTAS

Calibração significa comparar um elemento desconhecido com um determinado padrão conhecido, de forma a ajustar este elemento para que apresente as mesmas características do padrão. A calibração é bastante utilizada na indústria, principalmente no ajuste de instrumentos de medição, equipamentos ou mesmo em processos. Na elicitación de especialistas, a calibração está relacionada à precisão das respostas dos especialistas que, na grande maioria das vezes, estão enviesadas. Diz-se que um especialista está perfeitamente calibrado quando há ausência de vieses e existe uma acurácia das respostas em relação ao que está sendo observado na prática. Assim, um especialista bem calibrado pode ser caracterizado quando, por exemplo, suas atribuições de probabilidades de ocorrência acerca de um determinado evento remetem às frequências de ocorrência do evento em questão. Entretanto, ainda não existe um meio que possibilite a calibração perfeita de um especialista, sendo apenas possível a melhoria da acurácia das respostas. Esta melhoria é atingida através de um treinamento frequente e específico para uma determinada tarefa, considerando o feedback como uma forma de aferir os resultados ((LICHTENSTEIN; FISCHHOFF; PHILLIPS, 1982) *apud* (MEYER; BOOKER, 2001)). Meyer e Booker (2001) consideram que o processo de calibração de um indivíduo melhora com o conhecimento, sendo medido através da porcentagem de respostas corretas em um limite de até 80%. Quando a acurácia supera este limite, por exemplo o especialista acerta 90% das respostas, o especialista fica menos calibrado. Isto deve-se ao fato que estes indivíduos, por apresentarem um elevado grau de conhecimento, são bem mais cautelosos nas suas estimativas e, por consequência, acabam tendo uma certa ausência de confiança nas questões mais delicadas, superestimando assim suas opiniões.

Um dos maiores desafios da calibração está relacionado à melhoraria da acurácia em processo que envolvam a ocorrência de eventos inéditos ou raros, tendo em vista a ausência de um padrão. Existem, ainda, os casos de eventos futuros, que impossibilitam o feedback e, por consequência, dificultam o processo de calibração. Uma exemplificação destes casos é a elicitación de probabilidades em estudos de análise de risco.

Independente da dificuldade existente no processo de calibração deve-se levar em conta que a calibração está relacionada ao enviesamento e que o seu sucesso depende essencialmente da sua eliminação. Diz-se que há enviesamento quando um especialista apresenta vieses, isto é, existe uma diferença consciente ou subconsciente entre a resposta do

especialista e a descrição precisa do seu conhecimento (SPETZLER; STAEL VON HOLSTEIN, 1975). Na literatura, há uma lista de heurísticas de comportamento, sendo as mais comuns a da representatividade, da disponibilidade, do afeto, da ancoragem, da dependência e da coerência (KAHNEMAN; TVERSKY, 1974; ANGERE, 2008; KAHNEMAN, 2011). A Tabela 4.1 apresenta estas heurísticas

Tabela 4.1 – Principais heurísticas de comportamento

Heurística	Característica
Heurística da representatividade	Ocorre quando o especialista avalia a probabilidade de um evento pelo nível com que este evento se assemelha a outro. Se o evento avaliado apresentar alta representatividade, as probabilidades inferidas serão semelhantes às da população.
Heurística da disponibilidade	O julgamento é realizado a partir da facilidade de que tais eventos ocorram na mente do especialista. Por exemplo, se ocorreu um acidente em uma usina nuclear recentemente, é possível que o especialista apresente uma tendência para considerar uma maior probabilidade de ocorrência de acidentes em instalações nucleares em virtude desta evidência
Heurística do afeto	Considera as simpatias e antipatias dos especialistas. Por exemplo, um especialista que apresente grande afinidade por usinas nucleares poderá subestimar o risco de acidentes envolvidos neste tipo de instalação.
Heurística da ancoragem	O especialista emite sua opinião a partir da consideração de uma informação base pela qual é conduzido o processo. Por exemplo nos processos de elicitación de probabilidades, muitas vezes o especialista considera sua opinião a partir das medidas de posicionamento, isto é, média, mediana ou moda, ajustando os valores em função das particularidades do processo. Assim, existe a possibilidade da resposta do especialista apresentar um viés centralizador em relação às medidas de posicionamento.
Heurística da dependência	Ocorre quando um grupo de especialistas é influenciado por uma opinião adversa de um elemento do grupo. Nesta situação, caso a opinião adversa não seja relevante, há uma dependência não desejada que pode influenciar negativamente os resultados.
Heurística da coerência	Ocorre quando o julgamento dos especialistas está mais relacionado com a coerência do que com a evidência

Fontes: Kahneman e Tversky (1974); Angere (2008); Kahneman (2011)

De qualquer forma, existem alguns meios de se calibrar um especialista, sendo bastante comum a atribuição de pesos específicos aos especialistas. Esta atribuição, em geral, considera as características particulares do indivíduo como o conhecimento, a experiência e a formação, como será apresentado no estudo de caso do Capítulo 6 . Também foi visto na Seção 2.3.1 a atribuição de pesos a partir do método AHP onde, os especialistas eram comparados aos pares a partir sua formação, a experiência e o conhecimento ao longo de seu

histórico. Além destes casos, existe ainda o modelo bayesiano que será discutido na Seção 5.3. Este modelo permite inferir um determinado peso ao especialista e atualizá-lo a partir de uma evidência.

4.2. COMBINAÇÃO DAS OPINIÕES DE ESPECIALISTAS

Após a calibração dos especialistas, as opiniões são elicitadas, podendo ser agregadas ou combinadas convenientemente a fim de se obter o consenso. Conforme discutido no início deste capítulo, a combinação é um processo relativamente simples, tendo como objetivo reunir todas as opiniões e gerar um valor ou uma faixa de valores que represente as opiniões dos especialistas. Os processos de combinação matemáticos mais utilizados são os percentis, a média aritmética ponderada, a média geométrica ponderada, entre outros, que serão discutidos nas Seções 4.2.1 e 4.2.2. Além destes, existem os métodos baseados no consenso que serão discutidos na Seção 4.2.3.

4.2.1. Combinação matemática – médias ponderadas valores extremos

A combinação através das médias ponderadas é obtida a partir dos pesos dos especialistas e sua opinião. Podem ser subdivididas em

- 1) Média aritmética ponderada: considera o somatório dos produtos entre os valores inferidos pelos especialistas e seus respectivos pesos, conforme mostra a Eq. (4.1).

$$M_1 = \sum_{i=1}^n w_i \times p_i \quad (4.1)$$

onde,

M_1 Média aritmética ponderada;

n Número de especialistas;

w_i Peso do especialista i ;

p_i Valor inferido pelo especialista i .

- 2) Média geométrica ponderada: considera o produtório dos resultados obtidos em função da potência valores inferidos pelos especialistas e seus respectivos pesos, conforme mostra a Eq. (4.2).

$$M_0 = \prod_{i=1}^n (p_i)^{w_i} \quad (4.2)$$

onde,

M_0 Média geométrica ponderada;

n Número de especialistas;

w_i Peso do especialista i .

p_i Valor inferido pelo do especialista i

- 3) Média harmônica ponderada: Considera o inverso do somatório da razão entre o peso do especialista e seu respectivo valor inferido, conforme mostra a Eq. (4.6):

$$M_{-1} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{p_i}} \quad (4.3)$$

onde,

M_{-1} Média harmônica ponderada;

n Número de especialistas;

w_i Peso do especialista i .

p_i Valor inferido pelo especialista i

Além da combinação obtida a partir das médias ponderadas, é possível combinar as opiniões utilizando os valores extremos. Estes, consideram os valores máximo e mínimo inferidos pelos especialistas, sendo obtidos a partir das Eqs. (4.4) e (4.5), respectivamente.

$$M_{+\infty} = \max_{i=1}^E p_i \quad (4.4)$$

$$M_{-\infty} = \min_{i=1}^E p_i \quad (4.5)$$

onde,

$M_{+\infty}$ Valor máximo inferido pelos especialistas;

$M_{-\infty}$ Valor mínimo inferido pelos especialistas;

p_i Valor inferido pelo especialista i

4.2.2. Combinação matemática – percentis, decis, quartis e mediana.

Percentis são medidas de localização calculadas em um conjunto de dados (DODGE, 2008, p. 419). Os percentis dividem uma distribuição em cem partes igualmente prováveis, onde cada parte contém o mesmo número de observações. O percentil P_x é o valor C_x que contém $x\%$ das observações abaixo de C_x e $(100-x)\%$ das observações acima de C_x . Assim, quando se diz que o resultado da combinação das opiniões de especialistas, dada por $P(E)$, está localizada no percentil P_{40} , isto significa que 40% dos especialistas apresentaram valores inferiores a $P(E)$ e 60% apresentaram valores superiores a $P(E)$.

Em alguns casos, a distribuição é dividida em 10, 4 ou 2 partes que contêm o mesmo número de observações. Neste caso os pontos de divisão são denominados decis, quartis e mediana, respectivamente. Em geral, na combinação de opiniões de especialistas utilizam-se os quartis, trabalhando-se assim com os valores de P_{25} , P_{50} e P_{75} . O cálculo dos percentis é dado segundo o processo matemático apresentado a seguir:

- 1) Organizar as n observações na forma de uma distribuição de frequências.
- 2) Os percentis correspondem às observações nas quais a frequência relativa acumulada se iguala ou supera 1%, 2%, ..., 99%.
- 3) Se os dados estiverem desagrupados, ordená-los em ordem crescente e calcular os valores de i e k , que representam, respectivamente, a parte inteira e decimal do resultado da divisão de $j \times (n + 1) / 100$, onde j é o percentil a ser calculado e n o número de observações.
- 4) Calcular o valor do percentil a partir da Eq. (4.6)

$$C_j = x_i + k \times (x_{i+1} - x_i) \quad (4.6)$$

O exemplo a seguir ilustra o cálculo de percentis P_{25} , P_{50} e P_{75} para o custo de manutenção de um equipamento ao longo de 10 anos a partir das estimativas apresentadas por um grupo de especialistas. Cada especialista atribui um valor numérico que representa o gasto para manter o equipamento funcionando durante este período. Os valores estimados pelos especialistas estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Custo de manutenção segundo opinião dos especialistas

Especialista	Custo de Manutenção em 10 anos
A	R\$100.000,00
B	R\$150.000,00
C	R\$145.000,00
D	R\$160.000,00
E	R\$120.000,00

Para a obtenção do P_{25} , ordenam-se os valores obtidos pelos especialistas e calculam-se os valores de i e k conforme segue:

$$C = \{100.000,00; 120.000,00; 145.000,00; 150.000,00; 160.000,00\}$$

$$\frac{j \times (n + 1)}{100} = \frac{25 \times (6)}{100} = 1,5 \Rightarrow \begin{cases} i = 1 \\ k = 0,5 \end{cases}$$

$$C_{25} = 100.000,00 + 0,5 \times (120.000,00 - 100.000,00) = 110.000,00$$

Similarmente, calculam-se P_{50} e P_{75} obtendo os valores de 145.000,00 e 155.000,00

No caso de observações agrupadas em classes, os percentis são calculados conforme segue:

- 1) Determinar a classe do percentil a ser calculado a partir da frequência relativa acumulada;
- 2) Calcular o valor do percentil de acordo com a Eq. (4.7)

$$Percentil = L_1 + \left[\frac{(n \times q) - \sum f_{inf}}{f_{percentil}} \right] \times c \quad (4.7)$$

onde:

L_1	Limite inferior da classe do percentil
n	Número total de observações
q	Percentual da classe do percentil desejado
Σf_{inf}	Somatório das frequências inferiores ao percentil da classe
$f_{percentil}$	Frequência da classe do percentil
c	Amplitude do intervalo da classe do percentil

O exemplo a seguir mostra como são calculados os percentis a respeito da probabilidade de ocorrência de um evento E. As probabilidades foram obtidas a partir de um grupo formado por 15 especialistas que apresentaram as suas opiniões em relação ao evento E. Neste exemplo, desejam-se estimar os percentis $P_{25\%}$, $P_{50\%}$ e $P_{75\%}$, com base nas respostas obtidas dos especialistas. Inicialmente, as respostas dos especialistas foram agrupadas em classes, conforme apresenta a Tabela 4.3, de onde foram obtidos os valores relativos à frequência acumulada e à frequência acumulada relativa.

Tabela 4.3 – Opiniões dos especialistas agrupadas em classes

Classes	Frequências	Frequência Acumulada	Frequência Acumulada Relativa
1ª 0,00 – 0,10	1	1	6,67%
2ª 0,10 – 0,20	0	1	6,67%
3ª 0,20 – 0,30	2	3	20,00%
4ª 0,30 – 0,40	1	4	26,67%
5ª 0,40 – 0,50	4	8	53,33%
6ª 0,50 – 0,60	3	11	73,33%
7ª 0,60 – 0,70	2	13	86,67%
8ª 0,70 – 0,80	1	14	93,33%
9ª 0,80 – 0,90	1	15	100,00%
10ª 0,90 – 1,00	0	15	100,00%

A localização do percentil $P_{25\%}$ é obtida em função da frequência acumulada relativa, onde estes valores delimitam as classes dos percentis. Assim, para $P_{25\%}$ identifica-se que não existe uma frequência relativa igual a 25% e que a imediata superior corresponde ao valor de 26,67%. Isto sugere que o percentil de $P_{25\%}$ está localizado na 4ª classe. Os cálculos são efetivados aplicando-se a Eq. (4.7), citada anteriormente. Assim, obtém-se o valor de 0,37 para o percentil $P_{25\%}$ conforme apresentado na Eq. (4.8)

$$P_{25\%} = 0,3 + \left[\frac{15 \times \frac{25}{100} - 3}{1} \right] \times 0,1 = 0,37 \quad (4.8)$$

O mesmo procedimento é adotado para o cálculo de $P_{50\%}$ e $P_{75\%}$, obtendo-se os valores de 0,49 e 0,61. As Eqs. (4.9) e (4.10), apresentam o detalhamento dos cálculos.

$$P_{50\%} = 0,4 + \left[\frac{15 \times \frac{50}{100} - 4}{4} \right] \times 0,1 = 0,49 \quad (4.9)$$

$$P_{75\%} = 0,6 + \left[\frac{15 \times \frac{75}{100} - 11}{2} \right] \times 0,1 = 0,61 \quad (4.10)$$

O uso dos percentis é bastante adequado quando se necessita obter uma visão geral das opiniões dos especialistas, cabendo ao tomador de decisão escolher a melhor faixa de percentil de acordo com a necessidade. Um exemplo bastante prático ocorre na elicitação de probabilidade de falha em equipamentos críticos que possam comprometer a segurança da instalação. Neste caso, objetivando uma análise mais conservadora, o tomador de decisão pode escolher as maiores probabilidades de falha, mesmo que estas não representem a grande maioria dos especialistas.

4.2.3. Método baseado no consenso

No método baseado no consenso, a opinião combinada é alcançada a partir de uma discussão conduzida pela analista. Nesta discussão, há um debate entre os especialistas com foco na obtenção de um valor com possíveis intervalos de confiança ou de valores de quartis que satisfaçam as crenças do grupo. Em geral, este método pode sofrer um forte enviesamento, o que pode não gerar bons resultados. Isto deve-se ao fato que pode haver dominância de alguns elementos do grupo ou mesmo uma pressão no grupo para que seja obtido o consenso.

4.3. AGREGAÇÃO DE OPINIÕES DIFUSAS

Esta seção discutirá o processo de agregação de opiniões difusas. O termo difuso, nebuloso, ou simplesmente fuzzy refere-se à imprecisão de uma dada informação. De forma geral, ainda existe uma grande dúvida entre uma informação incerta e informação imprecisa, de forma que é possível encontrar o uso destes termos sendo referenciados no mesmo sentido. Com o intuito de acabar definitivamente com esta dúvida, na Seção 4.3.1 serão definidos estes conceitos de modo a relacionar os conceitos de possibilidade, probabilidade, lógica difusa e lógica clássica, aplicados a elicitación de especialistas. Este relacionamento será apresentado na Seção 4.3.2 e será a base para o entendimento do processo de agregação de opiniões difusas, assunto a ser abordado na Seção 4.3.3, que focará essencialmente no método de agregação por similaridade (*Similarity Aggregation Method - SAM*).

4.3.1. Incerteza e imprecisão

Frequentemente, ao se trabalhar com opiniões elicítadas de especialistas, o tomador de decisão se depara com dois conceitos bastante próximos, mas que na realidade diferem entre si. Estes conceitos são a imprecisão e a incerteza. Diversos estudos defendem este posicionamento, considerando a teoria das possibilidades que será apresentada na Seção 4.3.2 (MORE, 2004; ORTEGA, 2001; SANDRI; CORREA, 1999). Enquanto a imprecisão está associada com a falta de definição ou ambiguidade, a incerteza lida com a dúvida. Por exemplo, em sistemas de eclusas existe um tempo para que o sistema hidráulico seja acionado, permitindo o esvaziamento ou enchimento da eclusa. Em 100% dos casos este tempo está em torno de 12 a 15 minutos de operação para um volume de 50.000 m³ de água. Quando se depara com esta informação é possível observar que existe uma certeza sobre o tempo de operação que não será superior a 15 minutos ou inferior a 12 minutos. Por outro lado, existe uma imprecisão em relação ao tempo, tendo em vista que o intervalo apresentado não permite saber o tempo exato para realizar esta operação na eclusa. À medida que se reduz o intervalo de tempo de espera na eclusa, diminui-se a imprecisão e, em contrapartida, aumenta-se a incerteza. Desta maneira é possível entender melhor a diferença entre estes termos e evidenciar que o aumento da precisão não garante necessariamente a diminuição da

incerteza. Em geral, a abordagem destes conceitos envolve o conhecimento e discussão de teorias que serão apresentadas a seguir.

4.3.2. Lógica clássica, lógica difusa, teoria das probabilidades e teoria das possibilidades

A lógica é um ramo da filosofia criada por Aristóteles no século IV a.C. para estudar o pensamento humano a partir de um conjunto de regras para que conclusões possam ser aceitas como verdadeiras ou falsas. Esta lógica é tida como clássica e considera a linguagem natural como sua forma de expressão. A partir da lógica clássica, novos estudos foram desenvolvidos, e no século XIX, foi apresentada a lógica booleana, assim nomeada em homenagem ao matemático George Boole. A lógica booleana é uma lógica matemática que estuda as relações existentes entre os elementos e os conjuntos a partir de um universo de estudo. Nesta lógica a relação de pertinência entre um elemento e um conjunto é definida através de dois valores possíveis: verdadeiro ou falso. Uma das limitações da lógica booleana reside nos casos onde existe uma parcialidade de verdades, ou seja, a proposição não pode ser tratada nem como verdadeira nem como falsa. Nestes casos, a flexibilização da pertinência dos elementos faz com que estes valores sejam melhor caracterizados e aproveitados. Uma das teorias propostas para este fim é a teoria dos conjuntos difusos.

A teoria dos conjuntos difusos foi desenvolvida em 1965 pelo professor Lotfi Zadeh e tinha como objetivo tratar o aspecto vago da informação (ZADEH, 1965). Nesta teoria os elementos são representados através da função de pertinência que estabelece critérios para aceitação de valores em determinados conjuntos. De acordo com Zadeh (1965), um conjunto difuso A dentro de um universo Ω é definido por uma função de pertinência dada por $\mu_A: \Omega \rightarrow [0, 1]$, que associa a cada elemento x de Ω o grau $\mu_A(x)$ com o qual x pertence ao conjunto A . Quando o grau de pertinência de x assumir o valor unitário, diz-se que x é completamente compatível com o conjunto A . Por outro lado, um grau de pertinência nulo indica que x não apresenta nenhuma compatibilidade com o conjunto A . Valores entre 0 e 1 indicam parcialidade na compatibilidade de x em A .

Uma exemplificação bem simples da aplicação destas teorias seria na avaliação do conjunto dos homens altos. Suponhamos que, um indivíduo do sexo masculino seja considerado alto caso apresente altura acima de 1,80 m. A representação deste conjunto, considerando a lógica clássica, é dada pelo conjunto $H = \{x \in \mathbb{R} \mid x \geq 1,80 \text{ m}\}$. Nesta

definição, um indivíduo que apresentasse 1,79 m de altura não poderia ser considerado alto, mesmo que sua altura fosse suficientemente próxima de 1,80m. Esta condição deve-se à característica da lógica booleana, onde uma afirmação só pode ser verdadeira ou falsa e a transição entre as classes ocorre de maneira abrupta, conforme mostra o quadro (a) da Figura 4.1.

Figura 4.1 – Representação clássica (a) e difusa (b) dos homens altos

Quando este mesmo conjunto é avaliado pela ótica da teoria dos conjuntos difusos, há uma flexibilização na pertinência, onde o indivíduo com 1,79 m poderia estar mais próximo do grupo dos homens altos do que dos homens baixos. Isto se deve à transição suave dada pela função pertinência que, para este exemplo, poderia ser representada por:

$$\mu_x = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq 1,50 \\ \frac{10}{3}(x - 1,50) & \text{se } 1,50 \leq x \leq 1,80 \\ 1 & \text{se } x \geq 1,8 \end{cases}$$

Note que, nesta função, um homem é considerado baixo apenas se ele apresentar estatura inferior a 1,5 m. Com uma estatura entre 1,5 m e 1,8 m o indivíduo poderia ser considerado alto e baixo com um grau de pertinência que varia em função de sua altura. Assim, por exemplo, caso ele apresentasse uma altura de 1,65 m seria possível afirmar que ele apresenta o grau de pertinência de 0,5 tanto em relação ao conjunto de homens altos quanto ao conjunto de homens baixos. Esta característica confere à teoria dos conjuntos difusos uma transição entre classes bastante suave, conforme apresentado no quadro B da Figura 4.1.

A teoria dos conjuntos difusos está diretamente relacionada à teoria das possibilidades, associando por exemplo o conjunto dos “homens altos” a uma distribuição de possibilidades. Esta característica permite o tratamento tanto das incertezas como da imprecisão de forma única.

Como foi visto de início, frequentemente a opinião de especialistas lida simultaneamente com a imprecisão e incerteza de modo que seria impossível tratar estas informações exclusivamente com a lógica clássica ou com a teoria das probabilidades. Desta forma, quando um especialista diz, por exemplo, que a probabilidade de ocorrência de um evento é alta, ele, na verdade, está dizendo que existe uma possibilidade alta de ocorrer este evento e a determinação numérica deste valor vai depender da relação existente entre a expressão alta e sua função pertinência, que é tratado através da teoria das possibilidades. As expressões alta, baixa e média são denominadas termos linguísticos e podem ser associadas a conjuntos difusos, através da função pertinência, que associará a cada variável linguística um grau de razoabilidade ou compatibilidade com aquele conjunto. Deve-se ressaltar aqui que existe uma grande diferença entre a teoria das probabilidades e a teoria das possibilidades que foram exemplificados por Ortega (2001). No primeiro exemplo, a autora faz referência a um evento bem definido, onde se deseja determinar a probabilidade de se sortear uma bola vermelha em uma urna contendo n_b bolas brancas e n_v bolas vermelhas. Uma vez sorteada uma bola, não haverá mais nada a fazer, pois a bola será necessariamente branca ou vermelha e, a incerteza deixará de existir. Se o mesmo exemplo fosse analisado considerando uma urna contendo diversas bolas em tons de rosa, variando do vermelho ao branco não haveria sentido em perguntar a probabilidade de se sortear uma bola branca, pois este evento está mal definido e, portanto, não poderia ser tratado na teoria das probabilidades. Um segundo aspecto destacado pela autora é o fato que a probabilidade não considera as subjetividades como, por exemplo, as características psicológicas dos indivíduos, exemplificando através de uma aposta em um jogo de loteria, onde normalmente as pessoas evitam números sequenciais, uma vez que existe uma crença que estas sequências são pouco prováveis de ocorrer.

De qualquer forma, o uso da linguística como forma de expressão traz grandes vantagens no processo de eliciação, tendo em vista a sua adequabilidade no tratamento de informações dadas por seres humanos assim como facilidade na aplicação. Isto deve-se ao fato que é mais simples falar em termos de possibilidades do que em termos probabilísticos, uma vez que nem sempre o especialista está apto a inferir valores numéricos. Por outro lado, existe uma grande desvantagem no processo, uma vez que não é simples definir a função

pertinência, além do processo de agregação das opiniões não ser simples como veremos na próxima seção.

4.3.3. Agregação de opiniões difusas a partir do método de agregação por similaridade (Similarity Aggregation Method SAM)

Uma das maneiras propostas para se agregar opiniões difusas é o método de agregação por similaridade (SAM) que foi proposto por Hsi; Chen (1996). O método tem por objetivo agregar as opiniões dos especialistas a partir de conjuntos difusos que representem efetivamente a opinião de cada especialista. Válido tanto para grupos homogêneos, quanto heterogêneos, o método propõe construir as funções trapezoidais na forma de números difusos que serão comparados e agregados a partir de um algoritmo. Este algoritmo propõe a agregação de opiniões a partir da função similaridade que será apresentada ao longo desta seção. Uma das vantagens deste método é a possibilidade de trabalhar com variáveis linguísticas, facilitando o processo de elicitação.

Conceitualmente este método permite determinar funções trapezoidais a partir dos intervalos mais prováveis que uma variável aleatória pode assumir. A obtenção dos intervalos é realizada a partir da elicitação dos especialistas, onde, estes são questionados a estimar dois intervalos. O primeiro, deve representar o intervalo mais provável que contém a variável aleatória e o segundo, aquele intervalo que contém a variável aleatória com 100% de confiança. A partir desta determinação, são construídas as funções trapezoidais representantes a partir da lógica difusa. A Figura 4.2 mostra um exemplo de representação genérica da opinião de um especialista, dada por uma função trapezoidal, conhecida como função pertinência, onde a variável aleatória pode assumir valores contidos no intervalo $[a,d]$, com a máxima probabilidade de ocorrência no intervalo $[b,c]$.

Figura 4.2 –Função pertinência da opinião de um especialista

A partir das funções trapezoidais são determinadas as similaridades entre as opiniões dos especialistas a partir do cálculo do nível de similaridade. O nível de similaridade será definido mais adiante e quantifica quanto a opinião de um especialista E1 se aproxima de um especialista E2. Existe algum grau de similaridade entre duas opiniões quando a intersecção dos seus conjuntos difusos não é nula. Na Figura 4.3 é possível visualizar a similaridade de dois especialistas E1 e E2, representada pela área hachurada da figura.

Figura 4.3 – Representação da similaridade entre dois especialistas
Fonte: Adaptada de Hsi; Chen (1996)

Matematicamente, a intersecção de dois conjuntos difusos, representada pela área hachura, pode ser calculada a partir da Eq. (4.11).

$$\mu_A \cap \mu_B = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (4.11)$$

Em alguns casos particulares pode ocorrer das opiniões dos especialistas não apresentarem nenhuma similaridade, conforme ilustra a Figura 4.4. Nestes casos, Hsi e Chen, (1996) comentam sobre a possibilidade de geração de resultados irracionais durante o processo de agregação, sugerindo assim que uma nova seção de elicitacão seja realizada. Nesta nova seção, os especialistas devem revisar suas respostas de forma a obter ao menos uma pequena similaridade. Este procedimento é capaz de eliminar as maiores dispersões nas respostas, visando aproximar as respostas de um valor mediano.

Figura 4.4 – Representação da ausência de similaridade entre dois especialistas
Fonte: Adaptada de Hsi; Chen (1996)

A partir da verificação da similaridade entre as opiniões, efetua-se o cálculo do nível de similaridade entre os especialistas. Este é realizado aos pares a partir de uma matriz quadrada de ordem $\mathbf{n}$, onde $\mathbf{n}$ é equivalente ao número de especialistas. Esta matriz SM é conhecida como matriz de similaridade e esta apresentada na Figura 4.5, onde $S_{i,j}$ representa o nível de similaridade entre os especialistas $\mathbf{i}$ e $\mathbf{j}$. A matriz SM é importante para visualizar a combinação de diferentes opiniões tomadas aos pares de forma a verificar as possíveis inconsistências entre os especialistas. Uma das características da matriz SM é que a diagonal principal assume sempre um valor unitário. Esta particularidade deve-se ao fato que estão sendo comparadas duas opiniões idênticas e neste caso a função similaridade assume um valor unitário. Nos casos em que a opiniões não apresentam nenhuma identidade, as funções de pertinência não apresentam nenhum ponto de interseção e, portanto, a similaridade é nula.

$$SM = \begin{bmatrix} S_{1,1} & \cdots & S_{1,j} & \cdots & S_{1,n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ S_{i,1} & \cdots & S_{i,j} & \cdots & S_{i,n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ S_{n,1} & \cdots & S_{n,j} & \cdots & S_{n,n} \end{bmatrix}$$

Figura 4.5 – Matriz de similaridade

Numericamente, a matriz de SM pode ser obtida a partir do cálculo dos seus pares ordenados $S_{i,j}$ obtidos a partir do nível de similaridade ou de aceitação descrito nas Eqs. (4.12) e (4.13), respectivamente. Esta equação representa uma relação de áreas, isto é, o quanto a intersecção dos conjuntos difusos representa da união dos conjuntos.

$$S_{i,j} = S(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j) = \frac{\mu_{\tilde{R}_i} \cap \mu_{\tilde{R}_j}}{\mu_{\tilde{R}_i} \cup \mu_{\tilde{R}_j}} \quad (4.12)$$

$$S_{i,j} = S(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j) = \frac{\int_x \min \{ \mu_{\tilde{R}_i}(x), \mu_{\tilde{R}_j}(x) \}}{\int_x \max \{ \mu_{\tilde{R}_i}(x), \mu_{\tilde{R}_j}(x) \}} \quad (4.13)$$

onde,

$S(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j)$	Nível de similaridade ou de aceitação entre as respostas dos especialistas E_i e E_j
$\tilde{R}_i$	Estimativa do especialista E_i representada por um número difuso trapezoidal
$\tilde{R}_j$	Estimativa do especialista E_j representada por um número difuso trapezoidal
$\mu_{\tilde{R}_i}(x)$	Função pertinência para estimativa do especialista E_i

$\mu_{\tilde{R}_j}(x)$ Função pertinência para estimativa do especialista E_j

Nos casos de funções trapezoidais ou triangulares o nível de similaridade pode ser simplificado conforme mostram as Eqs. (4.14) e (4.15), respectivamente.

$$S(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j) = 1 - \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 |r_{ik} - r_{jk}| \quad (4.14)$$

$$S(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j) = 1 - \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 |r_{ik} - r_{jk}| \quad (4.15)$$

onde,

$S(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j)$ Nível de similaridade ou de aceitação entre os especialistas E_i e E_j

$\tilde{R}_i$ Estimativa do especialista E_i representada por um número difuso trapezoidal

$\tilde{R}_j$ Estimativa do especialista E_j representada por um número difuso trapezoidal

r_{ik} Valor real impreciso definido pelo especialista i na posição k dentro do intervalo difuso

r_{jk} Valor real impreciso definido pelo especialista j na posição k dentro do intervalo difuso

Estas equações permitem comparar as equivalências das estimativas dos especialistas a partir de uma comparação feita aos pares. Uma das particularidades destas últimas equações é a presença do módulo em sua formulação. Este módulo permite que os valores obtidos na combinação de dois especialistas sejam exatamente os mesmos, independente da ordem de comparação. Por exemplo, quando se calculam as similaridades de dois especialistas **E1** e **E2**, observa-se que o valor de $S_{1,2}$ é idêntico ao valor $S_{2,1}$ mostrando que a função é indiferente ao comparar **E1** com **E2** ou **E2** com **E1**. O valor obtido para o nível de similaridade representa o grau de concordância entre os especialistas, aumentando a concordância dos especialistas em função do incremento da função. Deve-se observar que a função similaridade deve se apresentar no intervalo de 0 a 1, isto é: $S(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j): x \rightarrow [0, 1]$. Assim, quando a função assume o valor unitário diz-se que os especialistas compartilham a mesma opinião, justificando assim os valores unitários presentes na diagonal principal da matriz SM . Valores intermediários

podem indicar maior concordância ou discordância. Assim, à medida que o valor da função decresce, diminui-se a similaridade entre os especialistas e aumenta-se a discordância.

A partir do cálculo do nível de similaridade entre os especialistas e, por consequência, da matriz similaridade, é possível calcular o valor médio do nível de similaridade para cada especialista, conforme apresentado na Eq. (4.16). Este valor mensura o nível de similaridade do especialista em relação ao grupo.

$$\overline{S}_R(E_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n S(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j) \quad (4.16)$$

onde,

$\overline{S}_R(E_i)$ Valor médio do nível de similaridade do especialista i em relação ao grupo
 $S(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j)$ Nível de similaridade ou de aceitação entre os especialistas E_i e E_j
 n Número de especialistas

O nível de similaridade também pode ser quantificado na forma percentual, conforme mostra a Eq. (4.17). Este valor é denominado como nível de similaridade relativo.

$$RA(E_u) = \frac{\overline{S}_R(E_u)}{\sum_{k=1}^n \overline{S}_R(E_k)} \quad (4.17)$$

onde,

$RA(E_u)$ Nível de similaridade relativo do especialista E_u
 $\overline{S}_R(E_u)$ Valor médio do nível de similaridade do especialista E_u em relação ao grupo
 n Número de especialistas

A partir do cálculo das similaridades é possível obter, finalmente, o consenso de cada especialista com relação ao grupo a partir do coeficiente de consenso apresentado na Eq. (4.18).

$$CC(E_u) = \beta \times w(E_u) + (1 - \beta) \times RA(E_u) \quad (4.18)$$

onde,

- $CC(E_u)$ Coeficiente de consenso do Especialista E_u em relação ao grupo
 β Fator de relaxamento
 $w(E_u)$ Peso do especialista E_u
 $RA(E_u)$ Nível de similaridade relativo do especialista E_u sobre o grupo

Este coeficiente representa o consenso de cada especialista com relação ao grupo de especialistas, onde é possível ponderar o consenso a partir do peso do especialista sobre o nível de similaridade do especialista. Esta ponderação é feita através do fator de relaxamento. Esta variável indica a importância dos pesos dos especialistas sobre o nível de similaridade relativo, isto é, quanto maior este valor, maior será a importância do peso do especialista em relação a sua similaridade. O valor a ser dado ao fator de relaxamento é uma responsabilidade do tomador de decisão e deve estar contido no intervalo $\beta: x \rightarrow [0, 1]$.

A partir do coeficiente de consenso é possível finalmente obter a agregação dos valores conforme apresenta a Eq. (4.19).

$$\tilde{R}_{AG} = CC(E_1) \times \tilde{R}_1 + CC(E_2) \times \tilde{R}_2 + \dots + CC(E_M) \times \tilde{R}_M \quad (4.19)$$

Deve-se ressaltar que o resultado obtido anteriormente é dado em termos de números difusos. Assim, para fins de cálculo, ou mesmo quantificação numérica, o valor deve ser convertido em um valor numérico a partir do processo conhecido como desfuzificação. A desfuzificação permite converter uma variável linguística em um único valor numérico. Um dos métodos propostos para esta conversão é baseado no centro de área, conhecido como *Center of Area (COA)*. O cálculo é realizado a partir da Eq. (4.20). Esta equação tem como objetivo buscar o valor x que divide a área formada pelo eixo x e a função pertinência.

$$X^* = \frac{\int \mu_i x dx}{\mu_i(x)} \quad (4.20)$$

onde,

- X^* Variável desfuzificada
 $\mu_i(x)$ Função pertinência agregada
 x Variável aleatória

A simplificação para funções trapezoidais ou triangulares é dada conforme mostram as equações (4.21) e (4.22):

$$X_{trapezoidal}^* = \frac{1}{3} \times \frac{(r_4 + r_3)^2 - r_4 \times r_3 - (r_1 + r_2)^2 + r_1 \times r_2}{r_4 + r_3 - r_2 - r_1} \quad (4.21)$$

onde,

$X_{trapezoidal}^*$ Variável desfuzificada para a função trapezoidal

- r_1 Início da rampa de subida do trapézio
- r_2 Término da rampa de subida do trapézio
- r_3 Início da rampa de descida do trapézio
- r_4 Término da rampa de descida do trapézio

$$X_{triangular}^* = \frac{r_1 + r_2 + r_3}{3} \quad (4.22)$$

onde,

$X_{triangular}^*$ Variável desfuzificada para a função triangular

- r_1 Vértice 1 do triângulo
- r_2 Ponto médio do triângulo, representando
- r_3 Vértice 2 do triângulo

A partir do processo de desfuzificação obtém-se o resultado agregado das opiniões em termos de possibilidade. É importante destacar que a variável desfuzificada não representa necessariamente a probabilidade de ocorrência de um determinado evento e sim uma variável denominada crisp. No Capítulo 6 será discutido em detalhes a conversão deste valor crisp em um valor probabilístico.

Desta forma, este capítulo encerra-se aqui, onde apresentou-se alguns métodos de agregação e combinação de opiniões de especialistas. Estes, podem ser aplicados de forma obter um resultado ou mesmo resumo de valores que representem a opinião de mais de um especialista. A combinação matemática é um dos mais simples, mas deve ser utilizada com critério uma vez que, por exemplo valores médios, tendem a ser influenciados por valores eventuais valores extremos como reportado por Fischhoff et al. (1978) *apud* Modica (2009). Por outro lado, os percentis dão uma flexibilidade para que o analista escolha melhor opção baseado na segurança desejada na sua planta, ou seja, o analista pode escolher entre um valor

com características mais ou menos conservadoras. A agregação por meio do consenso pode ser influenciada por um enviesamento que não é desejável no processo. Ainda sim, existe os casos onde a linguística se faz presente de forma que os métodos matemáticos tradicionais e usos dos percentis não são adequados. Neste caso a única opção é utilizar a lógica difusa e escolher um método que permita agregar estas opiniões como método SAM apresentado aqui. Por fim, o capítulo também fez referência aos processos de calibração de especialistas que emerge como uma solução para qualificar melhor os especialistas e obter assim melhores resultados durante a agregação e ou combinação de opiniões.

5. MODELO BAYESIANO APLICADO À ELICITAÇÃO DE ESPECIALISTAS

O modelo bayesiano aplicado à elicitação de especialistas é uma importante ferramenta para a atualização e especialização de frequências genéricas (APOSTOLAKIS et al., 1980; APOSTOLAKIS, 1982), onde os dados de frequência estão disponíveis, mas não podem ser utilizados de forma direta, em virtude de suas particularidades, como será visto na Seção 5.2. Meyer e Booker (2001, p.115) também consideram o modelo bayesiano como uma forma de agregação, pois permite agregar diferentes fontes de dados, sejam eles oriundos de um ou mais especialistas. Outras aplicações também podem ser citadas como, por exemplo, a calibração dos especialistas. Na Seção 5.3 será apresentado um exemplo de como, calibrar dois especialistas utilizando o método bayesiano. Em todos os casos, a ideia central é a utilização do Teorema de Bayes que será descrito na primeira seção deste capítulo.

5.1. O TEOREMA DE BAYES

O Teorema de Bayes permite a atualização de uma informação a partir de uma evidência prática ou baseada na subjetividade. A sua demonstração pode ser facilmente obtida a partir da teoria clássica da probabilidade, como veremos a seguir.

Na teoria clássica da probabilidade, a probabilidade de ocorrência simultânea (intersecção) de dois eventos dependentes A e B é dado conforme a Eq. (5.1) (MODARRES; KAMINSKIY; KRIVTSOV, 1999, p.29).

$$P(A \cap B) = P(A|B) \times P(B) \quad (5.1)$$

onde,

$P(A|B)$ Probabilidade condicional, ou seja, a probabilidade de ocorrência do evento A, dado que o evento B ocorreu;

$P(B)$ Probabilidade de ocorrência do evento B.

Partindo desta igualdade, esta relação pode ser reescrita em termos de B e A conforme mostra a Eq. (5.2).

$$P(A \cap B) = P(B|A) \times P(A) \quad (5.2)$$

Utilizando a lei comutativa, as Eqs. (5.1) e (5.2) podem ser igualadas conforme apresentado na Eq. (5.3) e, rearranjando os termos, obtém-se o Teorema de Bayes, apresentado na Eq. (5.4).

$$P(A \cap B) = P(B \cap A) \Rightarrow P(A|B) \times P(B) = P(B|A) \times P(A) \quad (5.3)$$

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \times P(A)}{P(B)} \quad (5.4)$$

Em geral, o termo $P(B)$ é desconhecido, dificultando a aplicação do teorema. Assim, prefere-se definir $P(B)$ usando o teorema da probabilidade total, que para dois eventos por ser representando como mostra a Eq. (5.5).

$$P(B) = P(B|A) \times P(A) + P(B|\bar{A}) \times P(\bar{A}) \quad (5.5)$$

Desta forma, o Teorema de Bayes pode ser reescrito conforme mostra a Eq. (5.6).

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \times P(A)}{P(B|A) \times P(A) + P(B|\bar{A}) \times P(\bar{A})} \quad (5.6)$$

A interpretação do Teorema de Bayes sugere uma relação entre probabilidades condicionadas, onde é possível definir a probabilidade a posteriori a partir das probabilidades condicionadas e probabilidades a priori. Resumidamente, isto significa que o teorema é capaz de inferir dados (probabilidade a posteriori) a partir da relação entre as evidências e a subjetividade. A Figura 5.1 mostra detalhadamente estas relações.

Figura 5.1 – Interpretação do Teorema de Bayes

Na literatura, é possível encontrar o Teorema de Bayes apresentado em diferentes formas, mas que apresentam o mesmo conceito. Apostolakis et al. (1980) apresenta o Teorema de Bayes na forma contínua e na forma discreta. A forma contínua esta representada na Eq. (5.7).

$$f(\lambda|E) = \frac{f(\lambda)L(E|\lambda)}{\int_0^{\infty} f(\lambda)L(E|\lambda)d\lambda} \quad (5.7)$$

onde,

$f(\lambda|E)$ Função densidade de probabilidade de λ dada a evidência E (densidade de probabilidade à posteriori);

$f(\lambda)$ Função densidade de probabilidade a priori (antes da evidência E);

$L(E|\lambda)$ Densidade de probabilidade da evidência E dado λ (função de verossimilhança).

Uma das grandes limitações impostas pela forma continua está na dificuldade da solução da integral que, de modo geral, não pode ser realizada analiticamente. Nesta condição, os cálculos podem até ser facilitados, desde que a função verossimilhança assuma determinadas famílias de distribuição conjugadas à distribuição a priori. Por exemplo, se a função de verossimilhança assumir uma distribuição de Poisson e a função de probabilidades a priori pertencer a uma classe de distribuições da família gama, a distribuição posteriori assumirá uma distribuição gama com parâmetros facilmente calculáveis. Entretanto, Apostolakis et al. (1980) afirmam que nem sempre isto é possível, dado que é comum os bancos de dados assumirem uma dada distribuição como, por exemplo, a distribuição lognormal. Neste caso os autores sugerem uma aproximação da distribuição contínua através da discretização conforme apresenta a Eq. (5.8).

$$f(\lambda_i|E) = \frac{f(\lambda_i)L(E|\lambda_i)}{\sum_i f(\lambda_i)L(E|\lambda_i)} \quad (5.8)$$

onde,

$f(\lambda_i|E)$ Aproximação discreta da distribuição de probabilidade a posteriori;

$f(\lambda_i)$ Aproximação discreta da distribuição de probabilidade a priori;

$L(E|\lambda_i)$ Probabilidade da evidência E dado λ_i (função verossimilhança).

De forma geral, o Teorema de Bayes apresentado na forma discreta apresenta grandes vantagens e pode ser aplicado nos casos envolvendo dados obtidos em banco de dados, ou

dados oriundos da opinião de especialistas. Na Seção 5.2, será apresentado o uso da discretização na determinação das probabilidades de falha a posteriori em equipamentos aplicados à indústria nuclear.

5.2. APLICAÇÃO DO TEOREMA DE BAYES NA ATUALIZAÇÃO DE DADOS

Um dos maiores desafios na utilização de banco de dados de falhas esta na escolha dos valores adequados para a aplicação em estudo. Em geral, os dados contidos nestes bancos são representados na forma de percentis, onde a escolha do valor mais adequado vai depender do analista. Segundo Apostolakis et al. (1980), as flutuações encontradas nestes bancos são originárias das possíveis variações que o componente ou equipamento podem apresentar. Informações sobre modelo, fabricante, modos de operação e manutenção do equipamento ou componente não estão discriminados nestas bases apesar de produzirem amplas variações nas taxas de falha. Estas variações, na maioria das vezes, conduzem os dados de falha a uma distribuição lognormal e devem ser interpretadas como curvas de variabilidade populacional. Por exemplo, no estudo do RSS (U.S. NRC, 1975), os dados de falha de geradores a diesel durante a partida estão representados na forma de percentis de 5% e 95%, o que dificultaria o analista na escolha entre estes valores. A escolha do valor mais adequado está condicionada essencialmente à particularidade da instalação, considerando-se a aplicação dos valores inferiores às instalações que apresentam as melhores condições, ou mesmo que as falhas não comprometam a segurança do sistema. Apostolakis (1982) sugere que a escolha destes valores esteja condicionada a uma ou mais evidências com objetivo de atualizar os valores de probabilidade de acordo com as condições operacionais da planta. Para eventos raros, estas evidências, em geral, são baseadas no subjetivismo, através do uso da opinião dos especialistas. Para eventos frequentes, estas evidências podem vir de um caso de falha na própria operação. A combinação da evidência com os dados genéricos utilizando o método bayesiano permite gerar curvas de distribuição específicas e assim realizar uma atualização das informações. Um dos exemplos apresentados por Apostolakis et al. (1980) é a atualização das taxas de falhas de geradores a diesel do RSS. A taxa de falha destes geradores, durante a partida, varia de 1×10^{-2} a 1×10^{-1} falhas por hora, correspondendo tais valores aos percentis de 5% e 95%. A Figura 5.2, extraída parcialmente da Tabela III 2-2 do RSS, exemplifica este caso.

TABLE III 2-2 (Continued)			
Component/Primary Failure Modes	Assessed Values		Nuclear Experience ^(a)
	Lower Bound	Upper Bound	
Diesels (complete plant)			
Failure to start, Q_d :	$1 \times 10^{-2}/d$	$1 \times 10^{-1}/d$	$3 \times 10^{-2}/d$
Failure to run, λ_o :	$3 \times 10^{-4}/hr$	$3 \times 10^{-2}/hr$	$1 \times 10^{-3}/hr$
Instrumentation			
Failure to operate λ_o :	$1 \times 10^{-7}/hr$	$1 \times 10^{-5}/hr$	$1 \times 10^{-6}/hr$
(a) All values are rounded to the nearest half order of magnitude on the exponent.			

Figura 5.2 – Taxas de falha de unidades de bombeamento incluindo motor

Fonte: RSS

Apostolakis (1982) sugere inicialmente a distribuição lognormal para representar estes dados através do cálculo dos parâmetros da distribuição, isto é, a média e variância, além de determinar a mediana. Inicialmente, os parâmetros da distribuição podem ser obtidos a partir da Eq. (5.9).

$$P_x = e^{(\mu + z\sigma)} \quad (5.9)$$

onde,

P_x Enésimo percentil;

μ Média da distribuição normal associada;

z Abscissa da normal padrão;

σ Desvio padrão da distribuição normal associada.

O abscissa da normal padrão define à distância do valor observado (a variável aleatória x), em relação à média é calculado conforme mostra a Eq. (5.10)

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (5.10)$$

Aplicando o logaritmo natural em ambos os lados da Eq. (5.9) se obtém a Eq. (5.11), obtendo a Eq. (5.12)

$$\ln(P_x) = \ln(e^{(\mu + z\sigma)}) \quad (5.11)$$

$$\ln(P_x) = \mu + z\sigma \quad (5.12)$$

Com a substituição dos valores de $P_{95\%}$ e $P_{5\%}$ do gerador a diesel na Eq. (5.12) é possível obter um sistema de equações conforme mostra a Eq. (5.13).

$$\begin{aligned} \text{Ln}(5\%) &= \mu - 1,645\sigma \\ \text{Ln}(95\%) &= \mu + 1,645\sigma \end{aligned} \rightarrow \begin{cases} -4,6565 = \mu - 1,645\sigma \\ -2,3539 = \mu + 1,645\sigma \end{cases} \quad (5.13)$$

A resolução deste sistema permite obter os valores dos parâmetros da distribuição normal que contêm estes dois percentis. Por ser uma distribuição normal, os parâmetros são representados pela média e o desvio padrão, com valores de $\mu = -3,3052$ e $\sigma = -0,6999$ falhas por demanda, respectivamente. Como a distribuição normal não apresenta grande sensibilidade nas caudas, estes valores devem ser convertidos para a distribuição lognormal com base nas Eqs. (5.14) e (5.15).

$$\alpha = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad (5.14)$$

$$\beta^2 = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad (5.15)$$

onde,

α Média da distribuição lognormal;

μ Média da distribuição normal;

σ Desvio padrão da distribuição normal;

β Desvio padrão da distribuição lognormal.

A aplicação destas equações permite obter os parâmetros da distribuição lognormal, isto é, média de $3,84 \times 10^{-2}$ e desvio padrão de $9,31 \times 10^{-4}$ falhas por dia. A mediana, conforme visto na Seção 4.2, corresponde ao $P_{50\%}$, ou seja, o percentil onde se encontram 50% das observações. Este valor pode ser obtido substituindo os valores da média e desvio padrão da distribuição normal na Eq. (5.9). Assim, obtém-se o valor de $P_{50\%} = 3 \times 10^{-2}$ falhas por demanda.

A discretização das probabilidades a priori é uma das possibilidades para a obtenção da função verossimilhança. A escolha do tipo de distribuição a ser atribuída para a cálculo da função verossimilhança depende essencialmente das evidências apresentadas. Nos casos onde existe a possibilidade de considerar que a ocorrência do evento de interesse ocorre segundo

uma taxa de constante, o número de ocorrências deste evento se ajustará a uma distribuição discreta de Poisson. Esta função está apresentada na Eq. (5.16) e seu único parâmetro é ρ , que também representa a média. Este valor pode ser obtido a partir da Eq. (5.17).

$$Pr(x) = \frac{\rho^x e^{-\rho}}{x!} \quad (5.16)$$

$$\rho = \lambda \times t \quad (5.17)$$

onde,

- $Pr(x)$ Probabilidade de ocorrência de x eventos (no caso em questão, falha dos geradores a diesel em uma planta nuclear) até o instante t ;
- ρ Parâmetro da distribuição (média);
- x Variável aleatória (número de ocorrências do evento/falhas);
- λ Taxa de ocorrência do evento de interesse (falha);
- t Tempo de operação.

Há casos onde a evidência é representada pelo número de falhas em determinado número de tentativas. Nesta situação é recomendado o uso de uma distribuição binomial. Desta forma, os valores da função verossimilhança podem ser obtidos a partir da Eq. (5.18).

$$Pr(x) = \binom{n}{x} p^x \cdot (1 - p)^{n-x} \quad (5.18)$$

onde,

- $Pr(x)$ Probabilidade de x elementos falharem em n tentativas;
- x Variável aleatória (número de falhas);
- n Número de verificações (tentativas);
- p Probabilidade de falha.

A Tabela 5.1 apresenta em detalhes os passos para a obtenção das probabilidades a posteriori do exemplo dos geradores a diesel. Neste exemplo, o analista deseja determinar as probabilidades de falha dos geradores a diesel durante a partida, onde as únicas informações que ele tem são os valores dos percentis $P_{95\%}$ e $P_{5\%}$ (oriundos dos bancos de dados) e as taxas de falha obtidas a partir da opinião dos especialistas. Além destes dados, é conhecida também

a existência de uma evidência na planta atual, na qual foram constatadas 5 falhas em 225 testes de partida. Assim, a probabilidade a priori é obtida a partir das taxas de falha e dos parâmetros da distribuição lognormal, calculados anteriormente. Os valores da função verossimilhança devem ser aproximados por uma distribuição binomial tendo em vista a evidência da planta, isto é, 5 falhas em 225 testes de partida dos geradores. A partir destes valores, calcula-se a quinta coluna que é o produto dos valores da função verossimilhança pelos valores da probabilidade a priori. Estes valores serão normalizados, a fim de obter a probabilidade a posteriori conforme o Teorema de Bayes.

Tabela 5.1 – Teorema de Bayes: falha durante a partida

Taxa de Falha λ_i	Probabilidade a priori $f(\lambda)$	Probabilidade a priori acumulada	Função Verossimilhança $L(E \lambda)$	$f(\lambda) \times L(E \lambda)$	Probabilidade à posteriori $f(\lambda E)$
0,0087	0,0383	0,0383	0,0344	0,0013	0,0169
0,0115	0,0467	0,0850	0,0741	0,0035	0,0445
0,0154	0,0848	0,1699	0,1327	0,0113	0,1445
0,0205	0,1227	0,2925	0,1752	0,0215	0,2758
0,0274	0,1552	0,4477	0,1555	0,0241	0,3097
0,0365	0,1619	0,6096	0,0810	0,0131	0,1682
0,0487	0,1454	0,7550	0,0202	0,0029	0,0377
0,0649	0,1095	0,8644	0,0019	0,0002	0,0026
0,0866	0,0704	0,9348	0,0000	0,0000	0,0000
0,1155	0,0380	0,9728	0,0000	0,0000	0,0000
Totais	0,9728			0,0779	1,0000

A Figura 5.3 apresenta o histograma das taxas de falha dos geradores a diesel durante a partida. Os valores foram obtidos a partir da tabela anteriormente apresentada, tendo em vista parâmetros da distribuição obtidos. Neste histograma, é possível visualizar os efeitos resultantes da evidência sobre a distribuição a priori. Neste caso, a evidência reduz a taxa de falha durante a partida, além de reduzir os valores da dispersão da distribuição a posteriori, quando comparado com a distribuição a priori.

Figura 5.3 – Histograma da probabilidade de falha priori e posteriori dos geradores a diesel

5.3. APLICAÇÃO DO TEOREMA DE BAYES NA CALIBRAÇÃO DE ESPECIALISTAS

Dada a possibilidade de muitas opiniões elicítadas apresentarem heurísticas de comportamento, a calibração torna-se um processo importante para a melhoria da qualidade das informações elicítadas, evitando, assim, o chamado enviesamento, assunto abordado anteriormente na Seção 4.1.

Uma das aplicações do Teorema de Bayes está na calibração dos especialistas, permitindo uma melhor acurácia nas opiniões. Pelo fato do teorema considerar as evidências do processo, ele beneficia diretamente o processo de calibração, prevenindo o enviesamento por dependência.

Em princípio, a calibração dos especialistas pode ser realizada a partir da ponderação das opiniões atribuindo pesos aos especialistas de forma a garantir a acurácia nas respostas durante os processos de elicitação. Porém, em muitos casos, a atribuição de pesos aos especialistas torna-se bastante complexa, logo, impossibilitando, a atribuição de valores adequados. Nestes casos, é possível atribuir um valor inicial e realizar sua atualização a partir do Teorema de Bayes, como será ilustrado no exemplo a seguir, de elaboração própria.

Suponha que uma empresa deseje estimar a confiabilidade de um produto com o objetivo de verificar se este produto irá ou não atender às exigências do mercado consumidor, tendo como parâmetro a sua vida útil. Devido à ausência do histórico de falhas deste produto, a empresa recorre à opinião de dois especialistas que irão avaliar a confiabilidade do produto sob determinadas condições. As informações sobre o conhecimento e experiência dos especialistas não são totalmente conhecidas e a empresa acredita que podem ocorrer heurísticas de comportamento durante a fase de elicitação, comprometendo assim os seus resultados. De forma a inibir tais heurísticas, a empresa decide inicialmente elicitar os especialistas e calibrá-los a partir de uma unidade que será colocada em teste. Os especialistas são elicitados, e atribuem as confiabilidades de 0,98 e 0,85 para o produto analisado, considerando as condições de operação do produto. Após a elicitação, uma unidade do produto é colocada à prova considerando as mesmas condições de uso que foram atribuídas durante o processo de elicitação. O tempo decorre, e nota-se que o produto atendeu adequadamente aos requisitos não apresentando falhas durante o tempo de teste. A partir desta evidência, a empresa concluiu que o primeiro especialista (que atribuiu a confiabilidade de 0,98) apresentou melhor acurácia, considerando que este admitiu um valor maior de confiabilidade em relação ao segundo. Mas, qual seria o peso a ser atribuído para cada especialista a fim de calibrar suas opiniões? Aplicando o Teorema de Bayes é possível estimar estes valores, conforme segue.

O primeiro passo é a definição do evento que, neste caso, é o produto operar sob determinadas condições sem apresentar falhas durante o tempo especificado pela empresa. Este evento é simbolizado por B . A segunda etapa é a determinação das probabilidades condicionais que se referem à chance do produto operar sem falhas segundo a opinião dos especialistas, denotados por A_1 e A_2 . Esta probabilidade leva em consideração as condições de trabalho e tempo de operação consideradas inicialmente pela empresa. Assim, define-se estas probabilidades como sendo $P(B|A_1) = 0,98$ e $P(B|A_2) = 0,85$. Tendo em vista que, inicialmente, a empresa não tem informações detalhadas sobre o valor ideal de calibração para cada um dos especialistas, ela admite a mesma chance de erro para cada especialista, atribuindo assim pesos iguais inicialmente de forma que $P(A_1) = P(A_2) = 0,5$. A partir destes dados e da evidência do sucesso no teste realizado é possível conferir os pesos dos especialistas e calibrá-los para as próximas etapas utilizando o Teorema de Bayes conforme mostra a Eq. (5.19).

$$P(A_i|B) = \frac{P(A_i) \times P(B|A_i)}{\sum_{i=1}^n P(A_i) \times P(B|A_i)} \quad (5.19)$$

onde,

- A_i Evento em que o especialista A_i está correto;
 n Número de especialistas;
 B Evento de sucesso no teste;
 $P(A_i)$ Probabilidade do especialista i estar correto em relação ao evento ou simplesmente peso do especialista i ;
 $P(A_i|B)$ Probabilidade do especialista A_i estar correto dado que o evento B ocorreu.

Substituindo as variáveis na Eq. (5.19) tem-se

$$P(A_1|B) = \frac{0,5 \times 0,98}{0,5 \times 0,98 + 0,5 \times 0,85} = 0,54 \quad (5.20)$$

$$P(A_2|B) = \frac{0,5 \times 0,85}{0,5 \times 0,98 + 0,5 \times 0,85} = 0,46 \quad (5.21)$$

Estes valores representam os novos pesos dos especialistas, ou seja, a calibração para o especialista. A partir destes valores é possível estimar a confiabilidade R do produto agregando as respostas conforme mostra a Eq. (5.22).

$$R = 0,54 \times 0,98 + 0,46 \times 0,85 = 0,92 \quad (5.22)$$

Este processo pode ser aplicado continuamente sempre que houver novas evidências, atualizando os pesos atribuídos aos especialistas. Supondo que foram realizados mais 2 testes, onde ocorreram 1 sucesso e 1 falha, a atualização dos pesos de cada especialista pode ser realizada conforme segue.

Definido como B1 o evento de teste 1 realizado com sucesso, B2 o evento de teste 2 realizado com sucesso e B3 o evento de teste 3 realizado com falha, a partir do Teorema de Bayes tem-se:

$$P(A_i|B1 \cap B2 \cap B3) = \frac{P(A_i) \times P(B1 \cap B2 \cap B3|A_i)}{\sum_{i=1}^n P(A_i) \times P(B1 \cap B2 \cap B3|A_i)} \quad (5.23)$$

Assim,

$$P(A_1|B1 \cap B2 \cap B3) = \frac{0,5 \times 0,98 \times 0,98 \times 0,02}{0,5 \times 0,98 \times 0,98 \times 0,02 + 0,5 \times 0,85 \times 0,85 \times 0,15} = 0,15 \quad (5.24)$$

$$P(A_2|B1 \cap B2 \cap B3) = \frac{0,5 \times 0,85 \times 0,85 \times 0,15}{0,5 \times 0,85 \times 0,85 \times 0,15 + 0,5 \times 0,98 \times 0,98 \times 0,02} = 0,85 \quad (5.25)$$

A partir dos resultados obtidos é possível inferir novos valores de pesos a serem atribuídos aos especialistas, atribuindo uma maior credibilidade para o especialista 2. Os resultados sugerem a aplicação respectivamente dos valores de 0,85 e 0,15 para os especialistas 2 e 1 face às novas evidências. O mesmo resultado poderia ter sido obtido considerando-se apenas as duas novas evidências após a realização do primeiro teste, conforme sugere o equacionamento apresentado a seguir.

$$P(A_1|B) = \frac{0,54 \times 0,98 \times 0,02}{0,54 \times 0,98 \times 0,02 + 0,46 \times 0,85 \times 0,15} = 0,15 \quad (5.26)$$

$$P(A_2|B) = \frac{0,46 \times 0,85 \times 0,15}{0,46 \times 0,85 \times 0,15 + 0,54 \times 0,98 \times 0,02} = 0,85 \quad (5.27)$$

6. ESTUDO DE CASO

Este capítulo exemplifica, de forma prática, o uso da opinião de especialistas aplicado na avaliação subjetiva de probabilidades, a partir dos dados de Saito et al. (2015). Neste trabalho, os autores fazem uma análise estatística dos acidentes da HTP, caracterizado por um histórico dos acidentes obtido a partir dos acórdãos dos tribunais marítimos. O objetivo principal dos autores era verificar a percepção dos especialistas em relação aos acidentes na hidrovia e confrontá-los com os dados obtidos no tribunal marítimo. As principais questões levantadas estavam relacionadas à determinação de probabilidades de ocorrência de determinados eventos, assim como obter um julgamento dos fatores de influência, tendo como foco principal a ocorrência de acidentes na HTP.

A proposição para este estudo de caso difere um pouco do trabalho já realizado pois, mostra em detalhes como processar as informações elicitadas a partir das teorias apresentadas anteriormente. Este estudo também enfatiza a dificuldade em fazer um levantamento estatístico de acidentes e relacionar estes dados com os obtidos pelos especialistas, tendo em vista algumas limitações que dificultam a análise. De forma geral, um estudo baseado unicamente em levantamento estatístico pode levar a falsos resultados, tendo em vista que, na maioria das vezes, os dados não estão relacionados a populações homogêneas e neste caso podem divergir significativamente de uma situação real. No caso das hidrovias, estas divergências podem estar relacionadas ao tipo de embarcação e suas características, à manutenção realizada, ao trecho navegado, e outros. Entretanto, isto não significa que estes dados sejam desprezíveis, pois muitas vezes eles permitem elucidar os casos onde há divergência ou inconsistências das opiniões, ou mesmo utilizá-los em um processo atualização.

Desta forma, a contribuição deste estudo reside essencialmente no processamento das informações obtidas nos questionários, a partir de um processo adequado e conveniente que permita uma combinação e agregação das informações (opiniões) elicitadas. Além desta característica, este faz uma análise de como o analista pode proceder nos casos em que haja divergências significativas ou inconsistências capazes de afetar negativamente os resultados. Ao final, o trabalho apresenta uma análise crítica dos resultados obtidos a partir de uma avaliação dos resultados junto ao levantamento histórico.

A divisão deste capítulo seguirá a seguinte ordem: Inicialmente serão discutidos os problemas, os questionários e a escolha dos especialistas. Posteriormente, serão avaliados os

perfis dos especialistas que, em função das suas habilidades e competências, serão calibrados de forma conveniente. A elicitación e o processamento das respostas serão avaliadas na terceira etapa, onde os especialistas opinarão sobre as seguintes possibilidades:

- 1) Possibilidades de danos relacionado ao indivíduo, danos materiais e danos ambientais decorrentes de um acidente na HTP;
- 2) Possibilidades de acidentes do tipo: naufrágio, encalhe, colisão, abalroação, água aberta, explosão, incêndio, varação, arribada, alijamento, avaria ou defeito que ponha em risco a embarcação ou tripulação;
- 3) Possibilidade dos fatores humanos, materiais e operacionais contribuírem para a ocorrência de um acidente na HTP.

Ao final serão apresentados os resultados obtidos e analisados em termos probabilísticos.

6.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA, ELABORAÇÃO DO QUESTIONÁRIO E SELEÇÃO DOS ESPECIALISTAS

No trabalho de Saito et al. (2015) foi apresentada a percepção de especialistas na condução de comboios na HTP, aplicando-se o processo de elicitación como uma forma de obtenção de informações. Os temas abordados foram elaborados a partir de um levantamento histórico que sinalizou quais problemas deveriam ser discutidos e avaliados pelos especialistas, segundo os objetivos dos autores. Desta maneira os especialistas opinaram sobre os tipos de acidentes, os tipos de consequências, os fatores envolvidos e suas probabilidades. Além desses temas, o autor também buscou determinar alguns fatores de influência e sua contribuição em um dado contexto.

Todo processo de elicitación foi conduzido a partir de questionários, conforme sugere o método Delphi, onde cada especialista apresentou sua percepção sobre os temas abordados. Os questionários são formulários padrões, contendo uma série de questões para serem respondidas pelos especialistas e elaborados de acordo com as necessidades do estudo. Em geral, os questionários são desenvolvidos pelo tomador de decisão e podem ir além do tema, questionando a respeito de outras informações que complementam as informações básicas para o tomador de decisão. O tomador de decisão é a pessoa responsável pela condução do

processo de elicitação, tendo as funções de elaborar os questionários e oferecer todas as informações necessárias para o preenchimento dos questionários. Além destas funções, cabe ao tomador de decisão selecionar os especialistas e gerenciar os resultados, agregando as opiniões de forma conveniente que, em geral, é atingida a partir da combinação das respostas obtidas. A primeira etapa do processo consiste na seleção dos especialistas que é realizada em função dos recursos disponíveis e dos objetivos a serem alcançados. Neste contexto, é importante que a escolha dos especialistas seja bastante criteriosa, pois estes serão responsáveis indiretamente pelo tipo de questionário e diretamente pela qualidade dos resultados. Por exemplo, ao se selecionar especialistas sem uma base sólida em estatística é possível a ocorrência de respostas inconsistentes quando estes questionários envolvem a elicitação de probabilidades de eventos. Nestes casos, a aplicação de questionários baseados em respostas vagas, como alto, baixo e médio torna-se mais adequada e pode gerar melhores resultados. Este caso será visto na prática no decorrer deste estudo de caso.

Uma segunda questão a ser observado durante o processo de escolha dos especialistas refere-se à homogeneidade do grupo. Em geral, o processo de elicitação não busca respostas exatas, mas sim quantificar as incertezas existentes no problema a ser abordado. Por este motivo, é possível trabalhar com diferentes grupos, que apresentem diferentes qualificações, experiências e, por consequência, diferentes enfoques. A escolha entre um grupo homogêneo ou heterogêneo depende do tipo de informação que se pretende obter, podendo grupos heterogêneos produzir respostas com grande variabilidade. Em alguns casos mais particulares é possível a ocorrência de respostas similares para grupos bem diferentes como citado anteriormente na Seção 3.

Saito et al. (2015) optaram por conduzir o processo de elicitação selecionando um grupo relativamente homogêneo, composto por 12 avaliadores com substancial conhecimento teórico e prático adquirido através da experiência profissional. A homogeneidade foi garantida a partir da seleção de 12 especialistas restritos às funções de comandantes (CMT) e imediatos (IMT) onde, o critério de seleção buscou identificar e convidar para participar da elicitação, os profissionais que apresentassem acima de 9 anos de experiência como aquaviários, além de experiências como pilotos fluviais (PFL) e conhecimentos na operação dos comboios da HTP. Assim, formou-se um grupo homogêneo e com habilidades semelhantes. De forma geral, recomenda-se que a escolha do grupo não seja realizada de maneira aleatória, mas considerando-se fatores como: tempo, espaço físico, habilidades e outros. Em geral, a escolha é feita a partir dos melhores recursos disponíveis. Neste caso, a facilidade de reunião dos especialistas e o acesso dos especialistas determinou o tipo do grupo

e o tipo de questionário a ser desenvolvido. O quadro resumo com os especialistas selecionados e suas respectivas qualificações estão apresentado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Resumo da qualificação e experiência dos especialistas em anos

Especialista	Experiência de aquaviário	Categoria de atuação	Experiência na categoria	Função ocupada	Experiência na função	Experiência na HTP
E1	> 20	PFL	0 – 2	CMT	0 – 2	17 – 20
E2	> 20	PFL	0 – 2	IMT	0 – 2	13 – 16
E3	17 – 20	PFL	0 – 2	CMT	0 – 2	17 – 20
E4	> 20	PFL	0 – 2	IMT	0 – 2	9 – 12
E5	> 20	PFL	0 – 2	CMT	> 10	*
E6	> 20	PFL	9 – 10	IMT	9 – 10	17 – 20
E7	> 20	PFL	0 – 2	IMT	0 – 2	> 20
E8	13 – 16	PFL	3 – 4	IMT	0 – 2	*
E9	13 – 16	PFL	0 – 2	IMT	0 – 2	13 – 16
E10	> 20	PFL	5 – 6	IMT	0 – 2	> 20
E11	9 – 12	PFL	0 – 2	IMT	0 – 2	9 – 12
E12	17 – 20	PFL	7 – 8	IMT	5 – 6	17 – 20

* Questões não respondidas pelos especialistas

A partir da seleção dos especialistas, Saito et al. (2015) desenvolveram os questionários e distribuiu para cada especialista onde, de forma anônima, individual e secreta foram respondidas as questões elaboradas. Os questionários foram divididos em duas partes, de forma a obter dois tipos de informações: os dados referentes à experiência/qualificação do especialista e os pertinentes ao problema em questão. Na primeira parte, foram formuladas algumas perguntas específicas, onde o especialista iria indicar sua experiência de navegação na HTP, sua atuação como aquaviário, bem como dados a respeito de sua função e categoria ocupadas. Em termos de experiência, buscou-se quantificar o tempo que os especialistas atuaram nos segmentos abordados, ou seja, tempo de atuação como aquaviário, tempo de atuação na categoria, etc. Já no nível de função e ocupação, buscou-se determinar a função atual de cada especialista, tais como comandantes, imediatos, etc. Alguns especialistas optaram por não responder algumas perguntas sobre o seu histórico profissional e foram considerados como integrantes da menor classe disponível. Esta característica pode ter ocorrido devido a uma falha no processo de elicitação ou mesmo uma insegurança do profissional em ser identificado, já que o questionário envolveu questões organizacionais. Todos estes detalhes serão convenientemente discutidos na Seção 6.2.

Na segunda parte dos questionários, foi discutido o problema, onde se procurou quantificar alguns elementos relacionados à probabilidade de ocorrência de eventos como na quantificação do grau de influência dos fatores contribuintes. Na determinação das probabilidades, buscou-se determinar as chances de ocorrência de alguns tipos de acidentes classificados pela legislação pertinente, assim como as chances de ocorrência de algumas das consequências possíveis. Além destas questões, foram discutidos também os fatores de influência que não serão alvo deste estudo de caso, sendo recomendados para trabalhos futuros.

Na determinação das probabilidades do tipo de acidente os autores buscaram avaliar a chance de ocorrência de acidentes envolvendo explosões, incêndios, colisões e outros; nas consequências, avaliaram-se a probabilidade de ocorrência de mortes, danos capazes de provocar invalidez permanente e lesões decorrentes de um acidente hidroviário. Os autores também determinaram quais seriam as probabilidades dos fatores humanos, materiais e operacionais serem os responsáveis pela ocorrência de um acidente. No caso de fatores humanos estes estavam relacionados à fatores internos relacionados a condição físicas (exemplo: fadiga, dor e desconforto), fatores internos relacionados ao estresse (exemplo: distração, velocidade da tarefa, monotonia), fatores internos mentais (exemplo: inteligência, agilidade na execução da tarefa), entre outros. A descrição detalhada dos fatores avaliados pode ser conferida em Saito et al. (2015). A Figura 6.1, apresenta a subdivisão dos problemas discutidos com os especialistas.

Acidentes		
Encalhe	Colisão	Arribada
Naufrágio	Abalroação	Varação
Alijamento	Água aberta	Incêndio
Explosão	Avaria/defeito*	

Consequências	
Morte ou invalidez permanente	
Danos materiais Obras civis e outros	Danos materiais Embarcações envolvidas
Danos Ambientais	Lesões

Fatores Contribuintes		
Fator Humano	Fator material	Fator Operacional

* Avaria ou defeito capaz de colocar em risco a embarcação, as pessoas ou a carga

Figura 6.1 – Elicitação de especialistas: problemas discutidos

Em todas as avaliações, o resultado foi obtido através de termos linguísticos, o que inicialmente determinou uma avaliação utilizando a lógica difusa, como veremos a seguir. Desta forma embora o questionário sugerisse as perguntas em termos probabilísticos, estes foram tratados a partir da teoria das possibilidades como será visto nas próximas seções, tendo em vista algumas limitações impostas pelo modelo probabilístico. Isto será discutido na Seção 6.4. A partir deste ponto, as informações foram processadas de forma conveniente, objetivando complementar os estudos realizado por Saito et al., (2015) e oferecer um processo bastante criterioso que garantisse resultados satisfatórios e que reflita as condições reais de uma avaliação subjetiva. Assim, na primeira etapa será feita a avaliação dos especialistas, onde alguns critérios foram estabelecidos, objetivando a calibração dos especialistas.

6.2. AVALIAÇÃO E CALIBRAÇÃO DOS ESPECIALISTAS

A avaliação do perfil dos especialistas visa identificar os indivíduos que apresentam um maior conhecimento em relação a cada integrante do grupo e, portanto, apresentariam respostas mais acuradas. Esta presunção parte de uma crença que os mais experientes e aqueles com maior conhecimento apresentariam as melhores respostas. Esta crença pode ser verdadeira na maioria dos casos, mas existem casos onde esta crença não pode ser aceita devido a um forte enviesamento dos especialistas ou mesmo devido às falácias presentes no conhecimento. Estes assuntos foram discutidos nas seções 4.1 e 1.1.2, respectivamente. Por outro lado, Stålhane (2017) apresentou casos específicos onde leigos e especialistas apresentam os mesmos resultados e, portanto, não haveria justificativa para divisão destes grupos. Nestes casos, calibrar os especialistas através da atribuição de pesos não surtiria o efeito desejado, já que as opiniões apresentam grande similaridade. Desta maneira, o analista deve estar ciente que não existe uma regra geral que assegure que o perfil do especialista irá garantir um equilíbrio nas respostas, mas um estudo criterioso pode facilitar a obtenção de bons resultados. Em geral, a avaliação dos especialistas passa por um processo de atribuição de pesos (calibração), onde as opiniões dos especialistas mais confiáveis são ponderadas de acordo com a experiência e conhecimento. Definir os especialistas mais confiáveis não é uma tarefa simples e há muita discussão a respeito. Não é possível saber quem são os melhores especialistas. Às vezes, as pessoas com um conhecimento muito detalhado não são os melhores indivíduos para quantificar as incertezas (COOKE; GOOSSENS, 2008) e, portanto, podem não contribuir positivamente durante o processo de elicitación. Levando-se em

consideração estes diferentes pontos de vista, a avaliação dos especialistas no estudo dos acidentes da HTP utilizou o modelo mais tradicional. Este modelo pontua cada especialista de acordo com as suas habilidades e experiências considerando sua área de atuação, formação acadêmica, tempo de serviço e, em alguns casos, idade. Alguns estudos têm utilizado este conceito como uma forma de distinguir as opiniões e equalizá-las durante as etapas de combinação e agregação de opiniões (EMRE et al., 2015; YUHUA; DATAO, 2005). Partindo desse pressuposto, os especialistas foram avaliados, sendo atribuídos pesos de acordo com os seguintes critérios:

Categoria de atuação do especialista: A categoria do especialista refere-se à posição ocupada pelos especialistas, sendo dividida em: mestre fluvial (MFL), mestre fluvial 2 (MFL2), contramestre fluvial (CMF), piloto fluvial (PFL) e capitão fluvial (CFL). A Tabela 6.2 apresenta a pontuação adquirida pelo especialista em função da sua categoria de atuação. Nesta classificação todos especialistas obtiveram 4 pontos, pois todos os indivíduos enquadraram-se na categoria de pilotos fluviais.

Tabela 6.2 – Pontuação adquirida pelo especialista em função da sua categoria de atuação

Categoria	Pontuação
Mestre Fluvial (MFL)	(1 Pts)
Contramestre fluvial (CMF)	(2 Pts)
Mestre Fluvial 2 (MFL2)	(3 Pts)
Piloto fluvial (PFL)	(4 Pts)
Capitão fluvial (CFL)	(5 Pts)

Função do especialista: A função do especialista refere-se à posição que o especialista ocupa atualmente, sendo subdivida em mestre, oficial de quarto, piloto e imediato e comandante. De acordo com a função ocupada, o especialista foi pontuado conforme mostra a Tabela 6.3. Nesta classificação os especialistas obtiveram 4 ou 5 pontos, já que a escolha foi limitada às categorias de imediatos e comandantes

Tabela 6.3 – Pontuação adquirida pelo especialista em relação à sua função

Categoria	Pontuação
Mestre fluvial (MFL)	(1 Pts)
Oficial de quarto	(2 Pts)
Piloto	(3 Pts)
Imediato (IMT)	(4 Pts)
Comandante (CMT)	(5 Pts)

Experiência: É o tempo de experiência em anos que o especialista atua em um determinado segmento. Neste quesito foram contabilizados a experiência do profissional atuando na categoria, na função, na HTP e como aquaviário. A pontuação neste quesito segue os critérios estabelecidos na Tabela 6.4, onde a pontuação acumulada é dada pela soma dos pontos acumuladas em cada segmento.

Tabela 6.4 – Critério de pontuação dos especialistas em relação ao tempo de experiência (dado em anos)

Tempo atuante na categoria ou na função ocupada	Pontuação adquirida pela função da categoria e função ocupada	Tempo atuante na HTP ou como aquaviário	Pontuação adquirida em função do tempo de aquaviário e experiência na HTP
0 – 2	(0 Pts)	0 – 4	(1 Pts)
3 – 4	(1 Pts)	5 – 8	(2 Pts)
5 – 6	(2 Pts)	9 – 12	(3 Pts)
7 – 8	(3 Pts)	13 – 16	(4 Pts)
9 – 10	(4 Pts)	17 – 20	(5 Pts)
> 10	(5 Pts)	> 20	(6 Pts)

A avaliação dos especialistas em função da Tabela 6.1 e dos critérios anteriormente estabelecidos permitiu a definição da pontuação de cada especialista, conforme mostra a Tabela 6.5. Nesta tabela, a pontuação adquirida é apresentada nos valores entre parênteses e segue os critérios anteriormente estabelecidos. Esta pontuação foi normalizada, onde se obtiveram os pesos de cada especialista. Assim, por exemplo, o especialista E1 acumulou 20 pontos, sendo 6 referentes a sua experiência de aquaviário, 4 referentes a sua categoria, 5 referentes a sua função e 5 referentes ao seu tempo de navegação na HTP. Os 20 pontos foram normalizados, obtendo-se o peso de 0,09.

Tabela 6.5 – Pontuação e peso obtidos pelos especialistas em função da qualificação e do tempo experiência
(*) Especialistas que não informaram a experiência na HTP

	Experiência de Aquaviário	Categoria	Experiência na categoria	Função	Experiência na função	Experiência na HTP	Total de Pontos	Peso
E1	> 20 (6 Pts)	PFL (4 Pts)	0 – 2 (0 Pts)	CMT (5 Pts)	0 – 2 (0 Pts)	17 – 20 (5 Pts)	(20)	0,09
E2	> 20 (6 Pts)	PFL (4 Pts)	0 – 2 (0 Pts)	IMT (4 Pts)	0 – 2 (0 Pts)	13 – 16 (4 Pts)	(18)	0,08
E3	17 – 20 (5 Pts)	PFL (4 Pts)	0 – 2 (0 Pts)	CMT (5 Pts)	0 – 2 (0 Pts)	17 – 20 (5 Pts)	(19)	0,08
E4	> 20 (6 Pts)	PFL (4 Pts)	0 – 2 (0 Pts)	IMT (4 Pts)	0 – 2 (0 Pts)	9 – 12 (3 Pts)	(17)	0,07
E5	> 20 (6 Pts)	PFL (4 Pts)	0 – 2 (0 Pts)	CMT (5 Pts)	>10 (5 Pts)	* (0 Pts)	(20)	0,09
E6	> 20 (6 Pts)	PFL (4 Pts)	9 – 10 (4 Pts)	IMT (4 Pts)	9 – 10 (4 Pts)	17 – 20 (5 Pts)	(27)	0,12
E7	> 20 (6 Pts)	PFL (4 Pts)	0 – 2 (0 Pts)	IMT (4 Pts)	0 – 2 (0 Pts)	>20 (6 Pts)	(20)	0,09
E8	13 – 16 (4 Pts)	PFL (4 Pts)	3 – 4 (1 Pts)	IMT (4 Pts)	0 – 2 (0 Pts)	* (0 Pts)	(13)	0,06
E9	13 – 16 (4 Pts)	PFL (4 Pts)	0 – 2 (0 Pts)	IMT (4 Pts)	0 – 2 (0 Pts)	13 – 16 (4 Pts)	(16)	0,07
E10	> 20 (6 Pts)	PFL (4 Pts)	5 – 6 (2 Pts)	IMT (4 Pts)	0 – 2 (0 Pts)	>20 (6 Pts)	(22)	0,10
E11	9 – 12 (3 Pts)	PFL (4 Pts)	0 – 2 (0 Pts)	IMT (4 Pts)	0 – 2 (0 Pts)	9 – 12 (3 Pts)	(14)	0,06
E12	17 – 20 (5 Pts)	PFL (4 Pts)	7 – 8 (3 Pts)	IMT (4 Pts)	5 – 6 (2 Pts)	17 – 20 (5 Pts)	(23)	0,10
Totais							229	1,00

Inicialmente, os resultados conferiram ao especialista E6 a maior credibilidade, enquanto os especialistas E8 e E11 foram os que obtiveram a menor credibilidade. Alguns especialistas apresentaram a mesma credibilidade e, portanto, o mesmo peso, como é o caso, por exemplo, de E1 e E5, ou de E2 e E3, entre outros. A Tabela 6.6 resume a classificação dos especialistas em relação a sua credibilidade.

Tabela 6.6 – Classificação dos especialistas em relação à credibilidade

Classificação	Especialista
1º	E6
2º, 3º	E12, E10
4º, 5º, 6º	E1, E5, E7
7º, 8º	E2, E3
9º, 10º	E4, E9
11º, 12º	E8, E11

A partir da calibração dos especialistas, foi possível equilibrar as respostas permitindo a agregação das opiniões e obtenção do consenso. Estas estampas serão discutidas em detalhes nas próximas seções onde, inicialmente serão avaliadas as probabilidades das consequências, segundo a ótica dos especialistas. Esta avaliação será conduzida em termos de possibilidade e convertida posteriormente em termos probabilísticos. Na sequência, seguindo

esta mesma metodologia, serão discutidas as probabilidades de diferentes tipos de acidentes e as probabilidades referentes a alguns fatores que influenciam a ocorrência de acidentes.

6.3. AVALIAÇÃO DAS POSSIBILIDADES DAS CONSEQUÊNCIAS

A avaliação das consequências resultantes de um acidente hidroviário foi concebida pelos especialistas em termos linguísticos, onde cada especialista avaliou subjetivamente a possibilidade de ocorrência das seguintes consequências: danos materiais em embarcações, danos materiais envolvendo obras civis e outros, danos ambientais e danos ao indivíduo, sendo estes últimos caracterizados por mortes, invalidez permanente e lesões. Para cada tipo de consequência, os especialistas avaliaram a chance de ocorrência utilizando os seguintes termos linguísticos: muito baixa (MB), baixa (B), moderada (M), Alta (A), muito alta (MA).

O questionário contava ainda uma alternativa onde os especialistas poderiam atribuir a probabilidade de ocorrência nula (Z) aos eventos discutidos. Esta alternativa, embora bastante questionável, servirá para quantificar melhor os especialistas em um processo de recalibração. A partir de uma aproximação numérica, os termos linguísticos são associados a números difusos, considerando uma escala bastante similar ao trabalho de Emre et al. (2015). Esta aproximação permite a conversão dos termos linguísticos em conjuntos difusos, conforme ilustrado na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Escala de conversão dos termos linguísticos em conjuntos difusos

Termo linguístico	Conjuntos difusos
Muito baixa	(0,000 ; 0,000 ; 0,166 ; 0,332)
Baixa	(0,166 ; 0,332 ; 0,332 ; 0,498)
Moderada	(0,332 ; 0,498 ; 0,498 ; 0,664)
Alta	(0,498 ; 0,664 ; 0,664 ; 0,830)
Muito Alta	(0,664 ; 0,830 ; 1,000 ; 1,000)

A escala de conversão também pode ser representada graficamente conforme mostra a Figura 6.2, onde a abcissa representa os valores de possibilidade e a ordenada a função de pertinência.

Figura 6.2 – Representação gráfica dos números difusos

Estas definições permitiram a avaliação das consequências em termos vagos, que necessariamente devem ser interpretados como possibilidades. Esta interpretação é resultado das opções presentes no questionário que, em sua grande parte, buscou trabalhar com os termos linguísticos. Desta maneira, a avaliação deste estudo de caso foi necessariamente abordada a partir da lógica difusa que lida com eventos que estão vagos ou mal definidos.

Na avaliação dos danos ao indivíduo foi considerada tanto a possibilidade de fatalidades graves, representadas por mortes ou invalidez permanente do indivíduo, como na possibilidade de lesões ao indivíduo. Estas avaliações estão apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 6.8 e 6.9, considerando as opiniões na sua forma mais natural, isto é, em termos linguísticos. Apesar desta forma ser bastante intuitiva ao ser humano, ela é vaga e imprecisa, não permitindo uma análise mais aprofundada. A conversão destes termos linguísticos em conjuntos difusos, a partir das definições apresentadas na Seção 6.3, delimita esta imprecisão, caracterizando melhor as opiniões e permitindo a comparação e agregação destes valores. Estas conversões podem ser visualizadas nas últimas colunas das tabelas.

Especialista	Peso (w)	Peso Norm. (wn).	Opinião	Representação do conjunto difuso
E1	0,09	0,12	B	(0,166; 0,332; 0,166; 0,498)
E2	0,08	0,10	MB	(0,000; 0,000; 0,166; 0,332)
E3	0,08	0,11	A	(0,498; 0,664; 0,664; 0,830)
E4	0,07	0,10	MB	(0,000; 0,000; 0,166; 0,332)
E5	0,09	0,00	Z	*
E6	0,12	0,16	MB	(0,000; 0,000; 0,166; 0,332)
E7	0,09	0,12	A	(0,498; 0,664; 0,664; 0,830)
E8	0,06	0,00	Z	*
E9	0,07	0,09	B	(0,166; 0,332; 0,166; 0,498)
E10	0,10	0,13	MB	(0,000; 0,000; 0,166; 0,332)
E11	0,06	0,08	MB	(0,000; 0,000; 0,166; 0,332)
E12	0,10	0,00	Z	*

* Opiniões não consideradas difusas

Especialista	Peso (w)	Peso Norm. (wn).	Opinião	Representação do conjunto difuso
E1	0,09	0,09	B	(0,166; 0,332; 0,166; 0,498)
E2	0,08	0,08	M	(0,332; 0,498; 0,498; 0,664)
E3	0,08	0,08	A	(0,498; 0,664; 0,664; 0,830)
E4	0,07	0,07	M	(0,332; 0,498; 0,498; 0,664)
E5	0,09	0,09	MB	(0,000; 0,000; 0,166; 0,332)
E6	0,12	0,12	B	(0,166; 0,332; 0,166; 0,498)
E7	0,09	0,09	A	(0,498; 0,664; 0,664; 0,830)
E8	0,06	0,06	MB	(0,000; 0,000; 0,166; 0,332)
E9	0,07	0,07	B	(0,166; 0,332; 0,166; 0,498)
E10	0,10	0,10	M	(0,332; 0,498; 0,498; 0,664)
E11	0,06	0,06	MA	(0,664; 0,830; 1,000; 1,000)
E12	0,10	0,10	MB	(0,000; 0,000; 0,166; 0,332)

Enquanto na avaliação das lesões não existiu nenhum especialista julgando uma possibilidade nula, os especialistas E5, E8 e E12 avaliaram a possibilidade de ocorrência de mortes ou invalidez permanente como sendo zero. Esta condição pode estar associada ao fato da heurística da disponibilidade, onde as opiniões são influenciadas a partir da lembrança de fatos recentes, podendo assim um especialista lembrar de uma lesão que ocorreu no passado,

mas nunca ter presenciado um caso envolvendo mortes ou invalidez permanente. Independente da influência sobre estas opiniões, uma possibilidade zero não pode ser interpretada como uma variável linguística e deve ser avaliada em função de cada circunstância. Aliado a este fato, existe ainda uma inconsistência nestes valores, tendo em vista os registros de mortes apresentados por Saito et al. (2015). Esta condição resultou na exclusão destas opiniões para próximas etapas e da necessidade de uma nova normalização dos pesos dos especialistas. Esta normalização, apresentada na terceira coluna das Tabelas 6.8 e 6.9, visa manter a coerência matemática, calibrando melhor os especialistas. Em alguns casos, estes valores não foram alterados e, portanto, os pesos mantiveram-se inalterados.

Na avaliação dos danos materiais e danos ambientais os mesmos procedimentos foram adotados onde, para os danos materiais, foi feita uma ampla caracterização abrangendo as possibilidades de danos em embarcações, obras civis e outros. As Tabelas 6.10, 6.11 e 6.12 apresentam estas condições, onde de maneira similar aos danos ao indivíduo, as opiniões foram convertidas em conjuntos difusos e realizados os ajustes necessários.

Tabela 6.10 – Opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de danos em embarcações decorrente de um acidente na HTP

Especialista	Peso (w)	Peso Norm. (wn).	Opinião	Representação do conjunto difuso
E1	0,09	0,10	B	(0,166; 0,332; 0,166; 0,498)
E2	0,08	0,09	MB	(0,000; 0,000; 0,166; 0,332)
E3	0,08	0,09	A	(0,498; 0,664; 0,664; 0,830)
E4	0,07	0,08	B	(0,166; 0,332; 0,166; 0,498)
E5	0,09	0,10	MB	(0,000; 0,000; 0,166; 0,332)
E6	0,12	0,13	B	(0,166; 0,332; 0,166; 0,498)
E7	0,09	0,00	Z	*
E8	0,06	0,06	MB	(0,000; 0,000; 0,166; 0,332)
E9	0,07	0,08	B	(0,166; 0,332; 0,166; 0,498)
E10	0,10	0,11	M	(0,332; 0,498; 0,498; 0,664)
E11	0,06	0,07	M	(0,332; 0,498; 0,498; 0,664)
E12	0,10	0,11	MB	(0,000; 0,000; 0,166; 0,332)

* Opiniões não consideradas difusas

Tabela 6.11 – Opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de danos em obras civis e outros decorrente de um acidente na HTP

Especialista	Peso (w)	Peso Norm. (wn).	Opinião	Representação do conjunto difuso
E1	0,09	0,09	B	(0,166; 0,332; 0,166; 0,498)
E2	0,08	0,08	B	(0,166; 0,332; 0,166; 0,498)
E3	0,08	0,08	A	(0,498; 0,664; 0,664; 0,830)
E4	0,07	0,07	B	(0,166; 0,332; 0,166; 0,498)
E5	0,09	0,09	MB	(0,000; 0,000; 0,166; 0,332)
E6	0,12	0,12	MB	(0,000; 0,000; 0,166; 0,332)
E7	0,09	0,09	MA	(0,664; 0,830; 1,000; 1,000)
E8	0,06	0,06	MB	(0,000; 0,000; 0,166; 0,332)
E9	0,07	0,07	B	(0,166; 0,332; 0,166; 0,498)
E10	0,10	0,10	M	(0,332; 0,498; 0,498; 0,664)
E11	0,06	0,06	M	(0,332; 0,498; 0,498; 0,664)
E12	0,10	0,10	MB	(0,000; 0,000; 0,166; 0,332)

Tabela 6.12 – Opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de danos ambientais decorrente de um acidente na HTP

Especialista	Peso (w)	Peso Norm. (wn).	Opinião	Representação do conjunto difuso
E1	0,09	0,11	B	(0,166; 0,332; 0,166; 0,498)
E2	0,08	0,10	B	(0,166; 0,332; 0,166; 0,498)
E3	0,08	0,10	MA	(0,664; 0,830; 1,000; 1,000)
E4	0,07	0,09	MB	(0,000; 0,000; 0,166; 0,332)
E5	0,09	0,00	Z	*
E6	0,12	0,15	B	(0,166; 0,332; 0,166; 0,498)
E7	0,09	0,11	MA	(0,664; 0,830; 1,000; 1,000)
E8	0,06	0,07	MB	(0,000; 0,000; 0,166; 0,332)
E9	0,07	0,09	M	(0,332; 0,498; 0,498; 0,664)
E10	0,10	0,12	MB	(0,000; 0,000; 0,166; 0,332)
E11	0,06	0,08	M	(0,332; 0,498; 0,498; 0,664)
E12	0,10	0,00	Indefinida**	-

* Opiniões não consideradas difusas

** Questões deixadas em branco pelos especialistas

Assim, similarmente aos danos ao indivíduo, houve um especialista que considerou nula a possibilidade de ocorrência de danos ambientais em acidentes na HTP. A possibilidade de inexistência de registros de danos ambientais na HTP, associados a uma definição clara de danos ambientais pode ter influenciado as opiniões deste especialista. Ainda nesta avaliação, um único especialista não respondeu esta questão, talvez por dúvida ou por uma falha na aplicação dos questionários. Casos como este foram tratados similarmente aos casos

anteriores, onde as contribuições destas opiniões ajudaram a melhorar os pesos especialistas. A atribuição de valores nulos para o peso destes especialistas não significa que estas opiniões não tiveram uma contribuição. De acordo com Cooke e Goossens (2008), esta medida preventiva dá maior robustez ao processo e elimina possíveis ruídos na análise.

Os resultados obtidos na conversão dos valores linguísticos permitiram a obtenção de valores mais precisos, oferecendo assim uma melhor comparação entre as opiniões. Isto deve-se ao fato de que não há semelhanças, por exemplo, entre uma possibilidade "MB" ou "B" quando estes termos são interpretados utilizando-se a lógica clássica. Entretanto, a aproximação destes termos em conjuntos difusos possibilita verificar e medir a semelhança entre as opiniões, partindo de critérios específicos e que será a base de cálculo para a obtenção do consenso entre as opiniões. Em termos práticos, esta verificação das opiniões considerou o método proposto por (HSI; CHEN, 1996) que, embora apresente algumas limitações, mostrou-se bastante adequado quando há um grande número de especialistas.

O método apresenta uma implantação matemática simples e pode ser sintetizado a partir de uma planilha eletrônica, como foi feito para este trabalho. A Tabela 6.13 mostra a similaridade $S(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j)$ existente entre as opiniões tomadas aos pares dos 12 especialistas em relação à possibilidade de ocorrências de morte ou invalidez permanente. O cálculo seguiu o método apresentado na Seção 4.3.3, onde o objetivo desta etapa é verificar se existe alguma semelhança ou divergência significativa entre as opiniões dos especialistas a partir do cálculo de S . O valor de S pode assumir qualquer número entre 0 a 1, onde na medida em que o valor de S aumenta, as opiniões tornam-se mais próximas e, portanto, há maior similaridade entre as opiniões dos respectivos especialistas. No momento em que $S(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j) = 1$, diz-se que as opiniões entre os especialistas i e j são idênticas. Assim, por exemplo, a partir da matriz similaridade é possível afirmar que os especialistas E2, E4, E6, E10 e E11 apresentam as mesmas opiniões e que estão mais alinhadas com E1 se comparadas com os especialistas E3 e E7. A similaridade existente entre as opiniões sobre a possibilidade de lesões, danos ambientais, danos à embarcação, danos em obras civis e outros também foi calculada e encontra-se no Apêndice A.

Tabela 6.13 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de mortes ou invalidez permanente decorrente de um acidente na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,00	0,83	0,63	0,83		0,83	0,63		1,00	0,83	0,83	
E2	0,83	1,00	0,46	1,00		1,00	0,46		0,83	1,00	1,00	
E3	0,63	0,46	1,00	0,46		0,46	1,00		0,63	0,46	0,46	
E4	0,83	1,00	0,46	1,00		1,00	0,46		0,83	1,00	1,00	
E5					1,00							
E6	0,83	1,00	0,46	1,00		1,00	0,46		0,83	1,00	1,00	
E7	0,63	0,46	1,00	0,46		0,46	1,00		0,63	0,46	0,46	
E8								1,00				
E9	1,00	0,83	0,63	0,83		0,83	0,63		1,00	0,83	0,83	
E10	0,83	1,00	0,46	1,00		1,00	0,46		0,83	1,00	1,00	
E11	0,83	1,00	0,46	1,00		1,00	0,46		0,83	1,00	1,00	
E12												1,00

A partir do cálculo da similaridade, a próxima etapa é a obtenção do consenso entre as opiniões em um processo de agregação. Tendo em vista obter um balanceamento igual entre os pesos dos especialistas e suas similaridades, considerou-se um fator de relaxamento $\beta = 0,5$ durante o cálculo do coeficiente de consenso, que foi discutido anteriormente na Seção 4.3.3. Este coeficiente, obtido a partir das similaridades média e relativa, é um percentual a ser aplicado em cada opinião de forma obter uma única resposta na etapa de agregação das opiniões, que será apresentada na Seção 6.3.1. A Tabela 6.14 apresenta as similaridades médias e relativas, além do coeficiente de consenso para os 12 especialistas obtidos a partir das Eqs (4.16), (4.17) e (4.18). Estes dados são referentes à possibilidade de mortes ou invalidez permanente. Os demais casos podem ser consultados no Apêndice B. A característica da similaridade média é que é possível verificar o alinhamento de um dado especialista em relação ao grupo, enquanto que a similaridade relativa apresenta os mesmos resultados só que em termos percentuais. Por exemplo, é possível verificar que os especialistas E7 e E3 foram os que menos se alinharam com o grupo, pois apresentaram as menores similaridades médias e relativas. O resultado é coerente, pois ambos especialistas julgaram como sendo alta a possibilidade de ocorrência do evento enquanto os demais se dividiram, opinando que estas possibilidades eram baixas e muito baixas. Esta característica irá refletir em um coeficiente de consenso inferior aos demais especialistas e que contribuirá

para o processo de agregação. Na agregação, as opiniões mais distantes apresentam um “peso inferior” em relação às demais, e este “peso” é denotado pelo coeficiente de consenso.

Tabela 6.14 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de mortes ou invalidez permanente decorrente de um acidente na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
$\overline{S_R}(E_i)$	0,803	0,824	0,569	0,824		0,824	0,569		0,803	0,824	0,824		
$RA(E_u)$	0,117	0,120	0,083	0,120		0,120	0,083		0,117	0,120	0,120		1,000
$CC(E_u)$	0,116	0,112	0,096	0,109		0,138	0,099		0,105	0,124	0,100		1,000

6.3.1. Agregação das opiniões e resultados obtidos

A agregação das opiniões é uma das etapas finais, onde as opiniões são consolidadas de forma conveniente objetivando a obtenção de um resultado único. Esta etapa foi obtida a partir do método SAM que considera cada coeficiente de consenso como um percentual de ponderação (específico para o especialista) e que deve ser aplicado à opinião do especialista em questão. A soma das opiniões ponderadas resulta na opinião agregada conforme mostra a Eq. (6.1), onde foi obtida a opinião agregada dos 9 especialistas.

$$\begin{aligned}
 \tilde{R}_{AG} = & 0,116 \times (0,166; 0,332; 0,166; 0,498) + 0,112 \times (0,000; 0,000; 0,166; 0,332) + \\
 & 0,096 \times (0,498; 0,664; 0,664; 0,830) + 0,109 \times (0,000; 0,000; 0,166; 0,332) + \\
 & 0,138 \times (0,000; 0,000; 0,167; 0,332) + 0,099 \times (0,498; 0,664; 0,664; 0,830) + \\
 & 0,105 \times (0,167; 0,332; 0,167; 0,498) + 0,124 \times (0,000; 0,000; 0,167; 0,332) + \\
 & 0,100 \times (0,000; 0,000; 0,167; 0,332) = (0,134; 0,203; 0,263; 0,466)
 \end{aligned} \quad (6.1)$$

Deve-se levar em consideração que este resultado considera a contribuição de cada especialista e deve necessariamente ser desfuzificado a fim de obter um valor numérico. Existem diversas maneiras de desfuzificar; neste estudo, optou-se pela utilização do método mais comumente utilizado desenvolvido por (SUGENO, 1999) *apud* (EMRE et al., 2015) que se baseia na determinação do centroide de massa. Desta maneira, o valor da variável desfuzificada pode ser obtido conforme mostra a Eq. (6.2)

$$\begin{aligned}
 X^* &= \frac{1}{3} \times \frac{(0,466 + 0,263)^2 - 0,466 \times 0,263 - (0,134 + 0,203)^2 + 0,134 \times 0,203}{0,466 + 0,263 - 0,134 - 0,203} \\
 &= 0,274
 \end{aligned} \quad (6.2)$$

Uma das particularidades do método SAM é que, em geral, não é possível encontrar uma relação entre variável desfuzificada e os dados de falha estatísticos. Esta particularidade deve-se à estreita relação existente entre a teoria da probabilidade e a teoria da possibilidade. Enquanto a teoria da probabilidade lida com a chance de um evento ocorrer, a teoria da possibilidade considera a razoabilidade do evento (ZADEH, 1978). Tendo em vista esta limitação, Onisawa (1990, 1996), Onisawa e Nisiwaki (1988) *apud* Emre et al. (2015) desenvolveram uma fórmula que permite a conversão da possibilidade de falha crisp (CFP) em probabilidade de falha (FP), conforme apresenta as equações (6.3) e (6.4).

$$FP = \begin{cases} \frac{1}{10^k}, & CFP \neq 0 \\ 0, & CFP = 0 \end{cases} \quad (6.3)$$

$$K = \left[\left(\frac{1 - CFP}{CFP} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \times 2,301 \quad (6.4)$$

onde,

FP	Probabilidade de falha
CFP	Possibilidade de falha crisp (X^*)

Para este estudo de caso será considerado o valor de FP como sendo a probabilidade de ocorrência do evento, assim como o valor CFP como sendo a probabilidade crisp de ocorrência do evento. Assim, a partir desta relação obtém-se o valor de $6,58 \times 10^{-4}$ referente à probabilidade de ocorrência de casos de mortes ou invalidez permanente, em um acidente hidroviário, segundo a opinião agregada dos especialistas. Este valor é resultado de um coeficiente de relaxamento $\beta = 0,5$, adotado inicialmente. Outros valores poderiam ser atribuídos, resultando em pequenas variações na probabilidade de ocorrência do evento, na faixa de $5,54 \times 10^{-4}$ a $7,75 \times 10^{-4}$. O gráfico da Figura 6.3 mostra a análise de sensibilidade destes valores. É importante destacar que a conversão dos conjuntos difusos em valores de probabilidade, permitem a obtenção de resultados bastante coerentes, tendo em vista que na medida que aumentamos a imprecisão (dada pela possibilidade) diminuímos por consequência a incerteza (dada pela probabilidade). Assim, se inicialmente fossem consideradas as opiniões dos especialistas E5, E8 e E12 como sendo integrantes da faixa (MB) seria obtida a

probabilidade de $4,50 \times 10^{-4}$. A redução deste valor deve-se ao fato que a opinião agregada destes especialistas $\tilde{R}_{AG} = (0,101; 0,154; 0,247; 0,450)$ apresenta uma maior imprecisão quando comparada com o caso anterior, o que faz com que a probabilidade de ocorrência seja reduzida. Assim, podemos concluir que a exclusão da opinião destes especialistas não gerou diferenças significativas e contribuiu para diminuir a imprecisão da resposta agregada.

Figura 6.3 – Influência do fator de relaxamento na probabilidade de ocorrência de mortes ou invalidez permanente

Similarmente, as probabilidades de ocorrência das demais consequências foram quantificadas e estão apresentada na Tabela 6.15.

Tabela 6.15 – Resumo dos resultados obtidos na avaliação das possibilidades de ocorrência das consequências

Item avaliado	Resultado Agregado $\tilde{R}_{AG}$	Possibilidade de ocorrência crisp (CFP)	Probabilidade de ocorrência (FP)
Danos ao indivíduo			
Morte ou Invalidez Permanente	(0,134; 0,203; 0,263; 0,466)	0,274	$6,58 \times 10^{-4}$
Lesões	(0,264; 0,396; 0,401; 0,611)	0,424	$2,84 \times 10^{-3}$
Danos materiais			
Embarcações envolvidas	(0,169; 0,280; 0,276; 0,518)	0,322	$1,12 \times 10^{-3}$
Obras civis e outros	(0,202; 0,315; 0,329; 0,550)	0,357	$1,59 \times 10^{-3}$
Danos ambientais	(0,235; 0,353; 0,374; 0,568)	0,388	$2,10 \times 10^{-3}$

6.4. AVALIAÇÃO DAS POSSIBILIDADES DE ACIDENTES

Da mesma forma em que foram avaliadas probabilidade de ocorrência das consequências resultantes de um acidente hidroviário, nesta seção serão avaliadas as

probabilidades de ocorrências dos tipos de acidentes decorrentes de um acidente hidroviário. Esses acidentes foram divididos em naufrágio, encalhe, colisão, abalroação, água aberta, explosão, incêndio, varação, arribada, alijamento e avaria ou defeito. Novamente, esta avaliação foi idealizada em termos linguísticos utilizando a mesma escala e opções apresentadas na Seção 6.3, onde os especialistas também tiveram a opção de julgar como sendo nula a possibilidade do evento. Esta opção não corresponde necessariamente a um termo linguístico e esses casos foram tratados à parte, objetivando uma melhor robustez do processo. Isto significa quantificar melhor os especialistas a partir do descarte das opiniões nulas e indefinidas. O descarte das opiniões nulas é justificado pelos dados históricos, enquanto que as opiniões indefinidas não permitem serem agregadas de forma conveniente. A Tabela 6.16 apresenta as opiniões referentes à possibilidade de ocorrência dos tipos de acidentes.

Tabela 6.16 – Opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência dos tipos de acidentes

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
Naufrágio	B	B	M	M	MB	MB	MA	MB	MB	MB	MB	MB
Encalhe	M	B	MA	B	B	A	A	B		A	MA	MB
Colisão	B	B	M		MB	MB	MA	MB	B	A	MA	B
Abalroação	B	M	M	M	MB	MB	MA	MB	MB	A	MA	MB
Água aberta	B	M	MB	A	Z	M	A	Z	M	MB	M	B
Explosão	B	MB		Z	Z	MB	MA	Z	B	MB	M	MB
Incêndio	B	B	B	MB	MB	MB	MA	MB	MB	MB	M	B
Varação	B	MB	B	MB	MB	B	A	MB	MB	B	MB	Z
Arribada	B	M	MB	Z	MB	B	Z	MB	MB	B	MB	MB
Alijamento	B	B	M	MB	Z	M	Z	Z	MB	MB	MB	MB
Avaria ou defeito	B										B	

A partir das opiniões elicitadas, a sequência de operações segue os mesmos passos adotados na avaliação da probabilidade de ocorrência dos danos. Para a conversão das variáveis linguísticas, utilizou-se a mesma escala definida na Seção 6.3, onde os valores nulos e indefinidos foram desconsiderados. Esta conversão permitiu o cálculo das similaridades entre os especialistas, onde o caso mais crítico foi a opinião sobre acidentes do tipo avarias ou defeitos. Neste caso, os especialistas estavam bastante indefinidos e apenas E1 e E11 responderam a esta questão, que por coincidência foram idênticas. Nos demais casos, não ocorreram opiniões indefinidas mas ocorreram alguns casos de opiniões nulas, como no caso de água aberta, explosões, varação, arribada e alijamento. Estas opiniões nulas contribuíram

para redefinir os pesos dos especialistas conforme mostra a Tabela 6.17. Esta tabela considera os pesos finais considerados para cada especialista para a avaliação de cada acidente.

Tabela 6.17 – Pesos dos especialistas após normalização

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
Naufrágio	0,09	0,08	0,08	0,07	0,09	0,12	0,09	0,06	0,07	0,10	0,06	0,10	1,00
Encalhe	0,09	0,08	0,09	0,08	0,09	0,13	0,09	0,06	0,00	0,10	0,07	0,11	1,00
Colisão	0,09	0,08	0,09	0,00	0,09	0,13	0,09	0,06	0,08	0,10	0,07	0,11	1,00
Abalroação	0,09	0,08	0,08	0,07	0,09	0,12	0,09	0,06	0,07	0,10	0,06	0,10	1,00
Água aberta	0,10	0,09	0,10	0,09	0,00	0,14	0,10	0,00	0,08	0,11	0,07	0,12	1,00
Explosão	0,13	0,11	0,00	0,00	0,00	0,17	0,13	0,00	0,10	0,14	0,09	0,14	1,00
Incêndio	0,09	0,08	0,08	0,07	0,09	0,12	0,09	0,06	0,07	0,10	0,06	0,10	1,00
Varação	0,10	0,09	0,09	0,08	0,10	0,13	0,10	0,06	0,08	0,11	0,07	0,00	1,00
Arribada	0,10	0,09	0,10	0,00	0,10	0,14	0,00	0,07	0,08	0,11	0,07	0,12	1,00
Alijamento	0,11	0,10	0,11	0,10	0,00	0,15	0,00	0,00	0,09	0,13	0,08	0,13	1,00
Avaria ou defeito	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41	0,00	1,00

Após a obtenção dos pesos dos especialistas, calculou-se as similaridades existentes entre eles. Estas similaridades, apresentas no Apêndices A e B, foram calculadas aos pares, em termos médios (similaridade média) e em termos percentuais (similaridade relativa). A similaridade calculada em termos percentuais, permitiu a obtenção dos coeficientes de consenso de cada especialista conforme apresentado no Apêndices B. Este valor, em conjunto com os pesos dos especialistas e com um fator de relaxamento $\beta = 0,5$, permitiu a agregações das opiniões e assim obter um conjunto difuso que representasse as opiniões dos especialistas. A probabilidade de ocorrência dos eventos foi obtida a partir da desfuzificação e conversão de cada conjunto difuso em valores de probabilidade, conforme foi apresentado na seção 6.3.1. A Tabela 6.18 resume os resultados obtidos na avaliação das possibilidades de tipos de acidentes.

Tabela 6.18 – Resumo dos resultados obtidos na avaliação das possibilidades de ocorrência dos tipos de acidentes

Tipo de acidente	Resultado agregado $\tilde{R}_{AG}$	Possibilidade de ocorrência crisp	Probabilidade de ocorrência
Naufrágio	(0,126; 0,194; 0,282; 0,475)	0,275	$6,66 \times 10^{-4}$
Encalhe	(0,359; 0,516; 0,499; 0,706)	0,525	$5,94 \times 10^{-3}$
Colisão	(0,251; 0,378; 0,384; 0,603)	0,411	$2,56 \times 10^{-3}$
Abalroação	(0,243; 0,342; 0,426; 0,592)	0,404	$2,40 \times 10^{-3}$
Água aberta	(0,280; 0,421; 0,418; 0,630)	0,443	$3,29 \times 10^{-3}$
Explosão	(0,147; 0,227; 0,298; 0,506)	0,301	$9,01 \times 10^{-4}$
Incêndio	(0,127; 0,211; 0,251; 0,476)	0,276	$6,67 \times 10^{-4}$
Varaço	(0,105; 0,184; 0,204; 0,437)	0,2444	$4,40 \times 10^{-4}$
Arribada	(0,088; 0,160; 0,206; 0,439)	0,233	$3,80 \times 10^{-4}$
Alijamento	(0,119; 0,198; 0,256; 0,473)	0,269	$6,19 \times 10^{-4}$
Avaria ou defeito	(0,166; 0,332; 0,166; 0,498)	0,332	$1,24 \times 10^{-3}$

6.5. AVALIAÇÃO DOS FATORES CONTRIBUINTES

A partir da avaliação das possibilidades dos tipos de acidentes e consequências foram avaliadas as possibilidades dos fatores humanos, operacionais ou materiais contribuírem para a ocorrência de um acidente. Nesta avaliação, os especialistas avaliaram as possibilidades considerando os mesmos critérios anteriormente apresentados, onde atribuíram-se às variáveis linguísticas os conjuntos difusos correspondentes. Observou-se que o especialista E8 não se sentiu confortável, deixando em branco as respostas referentes a esta avaliação. A Tabela 6.19 mostra em detalhes os julgamentos realizados pelos 12 especialistas.

Tabela 6.19 – Avaliação dos especialistas em relação às possibilidades dos fatores humanos, materiais e operacionais contribuírem para a ocorrência de um acidente hidroviário.

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
Fator humano	MA	B	M	M	MB	A	MA	*	MB	A	MA	MB
Fator material	MA	MB	MA	M	Z	MB	A	*	MB	A	MA	B
Fator operacional	M	MB	M	MB	M	MB	A	*	MB	A	MA	MB

*Questões não avaliadas pelo especialista

A partir das respostas dos especialistas e seus respectivos conjuntos difusos foi possível calcular as similaridades e avaliar assim o consenso. No cálculo do consenso foi considerado um fator de relaxamento $\beta = 0,5$ em conjunto com os pesos normalizados dos

especialistas. A normalização teve por objetivo suprir a ausência do especialista E8, que foi considerado apenas em termo reavaliação dos pesos, pois a ausência de respostas apenas iria aumentar as incertezas do processo. Os Apêndices A e B apresentam as similaridades e consensos obtidos neste processo.

Após o cálculo do consenso, finalmente as respostas são agregadas, nos mesmos modelos anteriormente apresentados. A agregação permite o cálculo das possibilidades de falha crisp e probabilidade de falha conforme mostra a Tabela 6.20.

Tabela 6.20 – Resumo dos resultados obtidos na avaliação das possibilidades dos fatores humano, material ou operacional contribuírem na ocorrência de um acidente hidroviário.

Fator Contribuinte	Resultado agregado $\tilde{R}_{AG}$	Possibilidade de ocorrência crisp	Probabilidade de ocorrência
Fator humano	(0,366; 0,495; 0,569; 0,714)	0,537	$6,46 \times 10^{-3}$
Fator material	(0,366; 0,490; 0,572; 0,718)	0,538	$6,49 \times 10^{-3}$
Fator operacional	(0,240; 0,333; 0,426; 0,590)	0,401	$2,34 \times 10^{-3}$

6.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Esta seção discute em detalhes os resultados obtidos no estudo de caso, a partir das probabilidades elicítadas dos especialistas. A análise leva em consideração as opiniões dos especialistas em conjunto com os dados históricos dos acidentes, objetivando verificar se as probabilidades subjetivas apresentam alguma correspondência com os dados históricos.

No levantamento histórico de acidentes de Saito et al. (2015), um dos objetivos dos autores era checar os tipos de acidentes na HTP, identificando as embarcações envolvidas, as causas dos acidentes e suas consequências. Este levantamento foi realizado a partir dos acórdãos do Tribunal Marítimo, no período de 2003 até 2012, onde se aproveitou para verificar também outros dados como: as causas dos acidentes, os fatores contribuintes, as consequências, entre outros. Considerando que haveria um processo de elicitação de especialistas, em uma primeira etapa os autores utilizaram os dados para estabelecer um perfil de questionário que visasse, dentre outros, elicitar junto aos especialistas as probabilidades de ocorrência dos potenciais eventos relacionados aos acidentes na HTP. Desta forma, os autores definiram o problema, elaborando um questionário que permitisse avaliar os mesmos eventos reportados nos acórdãos marítimos e verificar se a probabilidade de ocorrência destes eventos, segundo a opinião dos especialistas, refletia as frequências de ocorrência históricas.

A análise que aqui será feita busca complementar o trabalho original de SAITO et al. (2015), retomando os resultados apresentados na seção anterior e fazendo um confronto direto com os dados de frequência de modo a possibilitar uma avaliação mais crítica do problema. A diferenciação deste estudo para o trabalho original dos autores reside essencialmente em:

1. Enfoque linguístico: Este estudo contempla as opiniões em termos difusos que foram tratadas a partir da teoria da possibilidade conforme visto anteriormente. Este tratamento possibilitou a obtenção de resultados diferenciados, que efetivamente representaram a opinião dos especialistas de uma forma bastante natural. A maior contribuição desta está no fato de que o tratamento de variáveis linguísticas a partir da teoria da probabilidade não é adequado e pode gerar resultados inconsistentes, tendo em vista que estão sendo analisados dois conceitos muito distintos: a imprecisão e a incerteza.
2. Frequências especializadas: Na avaliação das frequências, verificou-se que existia um grande número de casos que não estavam diretamente relacionados com o problema, e a inclusão destes itens na análise não só poderia distorcer a análise como não seria adequado. Por exemplo, nas avaliações dos danos ao indivíduo, observou-se que a maior parte das ocorrências estavam relacionadas a embarcações de passeio e recreio, justificadas pelo alto índice de imprudências e negligências dos condutores destas embarcações. A análise dos acórdãos marítimos apresenta alguns casos de embriaguez, condutores não habilitados, entre outros que naturalmente não são usuais na condução de comboios. Desta forma, a inclusão destes casos aumentaria significativamente a taxa de ocorrência destes eventos, superestimando as chances de ocorrência dos eventos. A Tabela 6.21 mostra, por exemplo, que de um total de 88 casos de fatalidades e 27 de feridos analisados no território nacional, somente 3 mortes e 2 feridos pertenciam a embarcações comerciais navegando pela HTP.

Tabela 6.21 – Número de fatalidades e feridos em acidentes hidroviários.

Danos ao Indivíduo	<u>Número de casos de fatalidades</u>			<u>Número de casos de feridos</u>		
	Comboio	Outros	Σ	Comboio	Outros	Σ
Hidrovia Tietê-Paraná	3	56	59	2	8	10
Outras hidrovias	0	29	29	0	17	17
Totais	3	85	88	2	25	27

Desta forma, a análise destes dados foi limitada aos casos de acidentes considerando somente embarcações comerciais e que sofreram algum tipo de acidente nos trechos pertencentes à HTP. Esta limitação permitiu a obtenção de frequências especializadas e que foram mais adequadas para a análise.

3. Estimativa das probabilidades e cálculo das frequências de ocorrência dos eventos analisados: As frequências de ocorrência dos eventos de interesse foram obtidas a partir dos dados históricos de acidentes entre os anos de 2000 à 2010. Neste período, dos 164 acidentes ocorridos, apenas 40 acidentes estavam relacionados a comboios operando na HTP. Desta forma, a análise foi reduzida e permitiu uma melhor avaliação dos problemas relacionados aos acidentes de comboios na HTP. Os acidentes, que tiveram como consequência os danos ao indivíduo, estavam representados pelos casos onde ocorreram ou a morte de um tripulante ou o seu ferimento. Assim, 5 casos foram reportados sendo 3 mortes provocadas pela queda do tripulante ao mar e 2 casos de feridos. Na avaliação dos tipos de acidentes, observou-se que o acidente mais frequente foi a colisão contribuindo com 34 casos. Os casos de colisões além de provocar danos às embarcações, foram responsáveis por danos em obras civis. Desta maneira, das 34 colisões, apenas 3 provocaram danos exclusivamente às embarcações, indicando que a colisão das embarcações com obras civis é mais frequente que a colisão entre embarcações. Os acidentes que tiveram poucos registros foram o encalhe, avaria e explosão. Estes apresentaram apenas 1 ocorrência. Casos de naufrágio, abalroamento e incêndio não foram reportados. Por fim, com base nestas ocorrências, obteve-se as taxas de ocorrência dos eventos analisados considerando a razão entre número de casos e período analisado. A Tabela 6.22 resume estes resultados.

Tabela 6.22 – Estimativa das taxas de ocorrências dos eventos a partir dos dados históricos.

Evento	Nº de ocorrências	Taxa de ocorrência para 48 comboios $\lambda_H \left(\frac{\text{ocorrências}}{\text{ano}} \right)$
Fatalidades	3	$2,73 \times 10^{-1}$
Feridos	2	$1,82 \times 10^{-1}$
Danos em embarcações	36	3,27
Danos em obras civis e outros	31	2,82
Naufrágio	0	0
Encalhe	1	$9,09 \times 10^{-2}$
Colisão	34	3,09
Explosão	1	$9,09 \times 10^{-2}$
Abalroamento	0	0
Incêndio	0	0
Avaria	1	$9,09 \times 10^{-2}$
Outros	3	$2,73 \times 10^{-1}$

A partir do cálculo das frequências foi possível obter a probabilidade de ocorrência dos eventos considerando uma distribuição de Poisson, onde a variável aleatória representada o número de ocorrência do evento em análise. Estas probabilidades serão apresentadas no decorrer da análise.

4. Estimativa das probabilidades de ocorrência segundo os especialistas: As probabilidades de ocorrências dos especialistas foram obtidas a partir do processo de elicitación e avaliadas em função do período (em anos) e do número de ocorrências. Estas condições foram relacionadas ao levantamento histórico de acidentes e comparadas lado a lado, conforme mostra a Tabela 6.23. Nesta tabela está apresentado apenas a probabilidade de ocorrência de mortes na HTP, considerando os dados históricos e a opinião dos especialistas. Neste processo de elicitación, considerou-se que cada especialista julgou a possibilidade de ocorrência do evento a partir da sua experiência, ou seja, a chance do evento ocorrer com a embarcação que ele esta conduzindo. Esta consideração impacta significativamente os resultados, tendo em vista que, segundo dados do departamento hidroviário do Estado de São Paulo, a HTP opera atualmente com uma frota de 48 comboios, pertencentes a seis empresas distintas. A probabilidade de ocorrência dos eventos foi obtida a partir de uma distribuição de Poisson onde, a variável aleatória x representa o número de mortes e a

taxa ocorrência do evento λ_E segue uma distribuição exponencial, constante ao longo do tempo.

Tabela 6.23 – Comparativo entre probabilidade de ocorrência de mortes na HTP a partir dos dados históricos e da opinião de especialistas

Probabilidade de ocorrência de mortes segundo a opinião dos especialistas $P_E(x)$					Probabilidade de ocorrência de mortes segundo os dados históricos $P_H(x)$				
$\lambda_E = 6,58 \times 10^{-4}$		Número de fatalidades (x)			$\lambda_H = 2,73 \times 10^{-1}$		Número de fatalidades (x)		
ρ_E	Período (anos)	1	2	3	ρ_H	Período (anos)	1	2	3
$3,16 \times 10^{-2}$	1	3,06%	0,05%	0,00%	$2,73 \times 10^{-1}$	1	20,76%	2,83%	0,26%
$6,32 \times 10^{-2}$	2	5,93%	0,19%	0,00%	$5,45 \times 10^{-1}$	2	31,61%	8,62%	1,57%
$9,48 \times 10^{-2}$	3	8,62%	0,41%	0,01%	$8,18 \times 10^{-1}$	3	36,10%	14,77%	4,03%
$1,26 \times 10^{-1}$	4	11,14%	0,70%	0,03%	1,09	4	36,64%	19,99%	7,27%
$1,58 \times 10^{-1}$	5	13,49%	1,07%	0,06%	1,36	5	34,87%	23,78%	10,81%
$1,90 \times 10^{-1}$	6	15,69%	1,49%	0,09%	1,64	6	31,86%	26,07%	14,22%
$2,21 \times 10^{-1}$	7	17,73%	1,96%	0,14%	1,91	7	28,30%	27,01%	17,19%
$2,53 \times 10^{-1}$	8	19,64%	2,48%	0,21%	2,18	8	24,62%	26,86%	19,53%
$2,48 \times 10^{-1}$	9	21,40%	3,04%	0,29%	2,45	9	21,09%	25,88%	21,17%
$3,16 \times 10^{-1}$	10	23,04%	3,64%	0,38%	2,73	10	17,84%	24,32%	22,11%
$3,48 \times 10^{-1}$	11	24,16%	4,27%	0,49%	3,00	11	14,94%	22,40%	22,40%

Os resultados apresentados na Tabela 6.23 mostram que, segundo os dados históricos, a probabilidade de ocorrência de 3 mortes em 11 anos é de 22,40%, enquanto que segundo a estimativa dos especialistas é de 0,49%.

Estes resultados foram obtidos a partir das equações (6.5), (6.6), (6.7), (6.8) e (6.9) onde, as 2 primeiras referem-se à probabilidade calculada a partir dos históricos.

$$\lambda_H = \frac{n^{\circ} \text{ de ocorrências do evento}}{\text{período considerado}} \quad (6.5)$$

$$= \frac{3}{11} = 2,7 \times 10^{-1} \frac{\text{mortes}}{\text{ano}}$$

$$\rho_H = \lambda_H \times t = 2,7 \times 10^{-1} \times 11 = 3 \text{ mortes} \quad (6.6)$$

$$P_H(x) = \frac{\rho_H^x e^{-\rho_H}}{x!}$$

$$P_H(x=3) = \frac{3^3 e^{-3}}{3!} = 22,40\%$$
(6.7)

$$\rho_E = \lambda_E \times t \times n^o \text{ comboios} = 6,58 \times 10^{-4} \times 11 \times 48 = 3,48 \times 10^{-1} \text{ mortes}$$
(6.8)

$$P_E(x) = \frac{\rho_E^x e^{-\rho_E}}{x!}$$

$$P_E(x=3) = \frac{0,348^3 e^{-3}}{3!} = 0,49\%$$
(6.9)

Deve-se ressaltar que na Eq. (6.8) a média foi multiplicada por 48 comboios tendo em vista que a taxa $\lambda_E = 6,58 \times 10^{-3}$ está relacionada a uma única embarcação, segundo as considerações iniciais.

A comparação dos resultados mostra que no período considerado pelos especialistas, isto é, após 2012, a chance de ocorrência de eventos de mortes é inferior quando comparada ao período histórico. Gráficamente, a visualização destas diferenças em 11 anos fica bastante clara conforme mostra as Figuras 6.4, 6.5 e 6.6. Estas figuras, obtidas a partir dos valores da Tabela 6.23 ilustram as diferenças entre as probabilidades acumuladas obtidas a partir da opinião dos especialistas e dos dados históricos, considerando o período de 1 a 11 anos.

Figura 6.4 – Probabilidades de ocorrência de uma fatalidade

Figura 6.5 – Probabilidades de ocorrência de duas fatalidades

Figura 6.6 – Probabilidades de ocorrência de três fatalidades

A análise das diferenças encontradas leva a crença que as condições de segurança da hidrovia e das embarcações, consideradas pelos especialistas, não refletem o período passado, fazendo com que ocorra uma redução no número de fatalidades. No caso acidentes, onde existe a ocorrência somente de feridos, os resultados observados foram próximos ao contexto histórico apresentando uma diferença de 2,01%. Esta diferença é relativa entre as probabilidades obtidas a partir das opiniões dos especialistas e dos dados históricos, considerando a condição de 2 feridos em 11 anos. Na avaliação de acidentes, onde estes provocariam danos às embarcações ou em obras civis, os especialistas apresentaram taxas de ocorrência baixas de modo que, para a ocorrência de 36 casos de danos embarcações ou 31 casos de danos em obras civis, as probabilidades foram praticamente nulas. Estes resultados

são otimistas e leva a conclusão que os especialistas não acreditam que haveria um número tão elevado de acidentes capazes de ocasionar danos a embarcação e/ou nas obras em um período de 11 anos. Isto deve-se ao fato que as taxas de ocorrências históricas, apresentaram no passado probabilidades de 6,63% e para danos em embarcações e 7,15% para danos em obras civis. Considerando os tipos de acidentes ocorreram alguns casos, onde as probabilidades de ocorrência, calculadas com base nos especialistas e dados históricos, se aproximaram. O acidente do tipo avaria foi um dos casos que apresentou uma diferença de 2,73% da probabilidade de ocorrência de 1 avaria em 11 anos. Para os demais tipos de acidentes, algumas diferenças foram encontradas e refletem o otimismo dos especialistas, tendo em vista que estas estimativas foram inferiores às probabilidades obtidas a partir do histórico de acidentes. O gráfico da Figura 6.7 apresenta estas diferenças, considerando um determinado número de ocorrências x , que está apresentado na Tabela 6.24.

Figura 6.7 – Probabilidades de ocorrência obtidas a partir dos dados históricos e das opiniões dos especialistas

Nesta tabela também são apresentadas as taxas de ocorrências e média de ocorrência dos eventos discutidos considerando uma distribuição de Poisson, ambas obtidas a partir da avaliação dos especialistas e dos dados históricos. Nesta avaliação considerou-se uma frota de 48 comboios para um período de 11 anos de operação na HTP.

Tabela 6.24 – Comparativo entre probabilidade de ocorrência de eventos na HTP a partir dos dados históricos e das opiniões de especialistas

	x	Dados históricos			Opinião dos especialistas		
		λ_h	ρ_h	$P_h(x)$	λ_e	ρ_e	$P_e(x)$
Fatalidades	3	$3,48 \times 10^{-1}$	3,00	22,40%	$6,58 \times 10^{-4}$	$3,16 \times 10^{-1}$	0,49%
Feridos	2	$2,00 \times 10^{-1}$	2,00	27,07%	$2,84 \times 10^{-3}$	1,36	25,08%
Danos em embarcações	30	3,27	$3,60 \times 10^1$	6,63%	$1,12 \times 10^{-3}$	$5,39 \times 10^{-1}$	0,00%
Danos em obras civis e outros	28	2,80	$2,80 \times 10^1$	7,52%	$1,59 \times 10^{-3}$	$7,65 \times 10^{-1}$	0,00%
Naufrágio	0	0,00	0,00	100,00%	$6,66 \times 10^{-4}$	$3,20 \times 10^{-1}$	70,35%
Encalhe	1	3,40	1,00	36,79%	$5,94 \times 10^{-3}$	2,85	13,63%
Colisão	34	$1,00 \times 10^{-1}$	$3,40 \times 10^1$	6,83%	$2,56 \times 10^{-3}$	1,23	0,00%
Explosão	1	$2,00 \times 10^{-1}$	1,00	36,79%	$9,01 \times 10^{-4}$	$4,33 \times 10^{-1}$	29,57%
Abalroamento	0	0,00	0,00	100,00%	$2,40 \times 10^{-3}$	1,15	28,14%
Incêndio	0	0,00	0,00	100,00%	$6,67 \times 10^{-4}$	$3,20 \times 10^{-1}$	70,31%
Avaria	1	$1,00 \times 10^{-1}$	1,00	36,79%	$1,24 \times 10^{-3}$	$5,98 \times 10^{-1}$	34,06%
Outros	3	$3,00 \times 10^{-1}$	3,00	22,40%	$4,73 \times 10^{-3}$	2,27	21,37%

Ao fim, pode-se concluir que a elicitación apresentou bons resultados e que, de maneira geral, aproximou-se dos dados históricos. As diferenças encontradas em alguns casos são resultados das diferentes interpretações que os especialistas têm do passado com o presente, em termos de segurança na hidrovia, rigidez dos procedimentos operacionais, entre outros. Esta constatação pode ser caracterizada pelo fato que não houve nenhuma probabilidade que os especialistas onde o julgamento dos especialistas superou os dados históricos. As probabilidades de danos ambientais não tiveram precedentes, assim não foi possível fazer uma avaliação. Por fim não foi realizada uma avaliação dos fatores contribuintes com os dados históricos, tendo em vista as limitações e diferentes interpretações que podem ser obtidas dos acórdãos marítimos, sendo recomendado para trabalhos futuros.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O uso da elicitación de especialistas em estudos de confiabilidade e análise de risco é uma importante fonte de conhecimento para auxiliar os casos onde os dados de frequência não estão disponíveis ou não são suficientemente satisfatórios para se realizar uma avaliação. Nestes estudos, a elicitación de especialistas pode atuar tanto na determinação das probabilidades de ocorrência dos eventos, como lidar na previsão de eventos futuros. Isto, dá margem para que um analista possa se antecipar aos acontecimentos e traçar as possíveis medidas de contingência e/ou mitigação. As interpretações clássica e frequentista têm explorado bastante as necessidades dos estudos de probabilidade, mas apresentam algumas limitações que impedem seu uso em determinados casos. Nestes casos, a interpretação subjetiva, ou o uso da opinião de especialistas, emerge como uma solução flexível, permitindo a solução do problema de forma individual ou em conjunto com uma ou mais teorias. Quando aplicada em conjunto existe a possibilidade de obtenção de resultados não alcançáveis em aplicações individuais, como, por exemplo, a atualização de informações obtidas a partir da interpretação clássica de probabilidades aplicando-se o método bayesiano.

De forma geral, a elicitación dos especialistas é uma das primeiras etapas, onde se objetiva adquirir conhecimento especializado a partir da aplicação de um método ou técnica de elicitación. Estes foram apresentados de maneira concisa e motivaram o trabalho a descobrir as inter-relações existentes entre outras áreas, contribuindo para a compreensão da elicitación de especialistas. Assim, percebeu-se que não bastava conhecer o conceito de aplicação da técnica ou método, mas foi necessário adquirir um conhecimento que estava diretamente relacionado aos campos da matemática, estatística, filosofia, psicologia e engenharia. Estes conhecimentos, que foram apresentados de forma sucinta, permitiram uma melhor compreensão dos métodos e técnicas, subsidiando assim um entendimento bastante claro e que permitisse uma reavaliação das inter-relações. Na filosofia, por exemplo, a noção de conhecimento e inteligência é prioritária para entender o que buscam as técnicas e métodos pois estes fazem parte do processo. Além disso, foi visto que a elicitación parte do conhecimento do especialista e que nem sempre este conceito está claro para o analista. No método AHP foi visto que é desejável uma certa inconsistência entre as opiniões e que esta está diretamente relacionada com o EIK, conhecimento estudado a partir das bases da filosofia. A matemática, teve a sua contribuição também, tendo em vista que seria impossível estudar o método AHP sem a base de operações com matrizes, transformação linear e o uso

dos autovalores. A estatística foi explorada fazendo-se bastante presente nas estimativas paramétricas, na distribuição de probabilidades e nos processos de combinação de opiniões através dos percentis. A psicologia atuou esclarecendo as heurísticas do comportamento, permitindo o entendimento da calibração dos especialistas, evitando assim os possíveis vieses que podem afetar os resultados. Por fim, a engenharia, abraçou todas estas áreas e, em uma tentativa de determinar e solucionar os problemas do dia a dia, redesenhou o estudo das falhas e riscos associados, aplicando a análise subjetiva em todos os problemas, onde o processo tradicional é ineficiente.

Desta forma, foi possível explorar as técnicas a partir de exemplos práticos da literatura e de alguns exemplos originais, buscando entendimento integral em função das diferentes conotações de aplicabilidade. Nos métodos diretos foi descrito o método Delphi, um método que tem como característica principal a aplicação de questionários de forma anônima, com a possibilidade de reavaliação das respostas a partir das rodadas. Sua vantagem reside em evitar os potenciais vieses, além do confronto direto entre os especialistas. A desvantagem ocorre quando a interação do grupo é desejável, que neste caso, pode ser substituído pela técnica NGT, uma técnica derivada do método Delphi que tem como prioridade a geração de ideias a partir da interação. Além destes, foi apresentada a análise de cenários, uma técnica perceptiva diretamente relacionada com as árvores de eventos e árvores de decisão. Apesar de ser uma técnica de fácil aplicação, pode se tornar bastante complexa quando as árvores começam a apresentar um grande número de ramos. Nas técnicas indiretas foi apresentado o método de Firmino e Drogue, que se baseia na divisão de intervalos, a técnica de taxa de apostas e o AHP, um processo hierárquico que permite uma simplificação do problema a partir de um comparativo aos pares e permite a verificação da consistência dos resultados. No fechamento, apresentaram-se as estimativas paramétricas que são úteis na determinação da probabilidade a partir dos intervalos de confiança da média.

Após o estudo do processo de elicitación, foi discutido o alinhamento entre os especialistas e os métodos de combinação e agregação de opiniões. O alinhamento foi apresentado como uma forma de verificar a existência de concordância entre os especialistas, considerando um processo de classificação. Na combinação e agregação, buscou-se apresentar as formas de combinar ou agregar os resultados, dadas em termos numéricos ou linguísticos, onde foi essencial a discussão da teoria dos conjuntos difusos.

Finalizado o estudo teórico, foram discutidos os modelos bayesianos aplicados a elicitación de especialistas em termos de atualização de probabilidades e como uma alternativa à calibração de especialistas. Na atualização de probabilidades, mostrou-se a importância do

teorema a partir do estudo do RSS, onde existe uma incerteza e que esta não pode ser tratada pelos meios convencionais.

Por fim, através do entendimento dos conceitos anteriormente discutidos, buscou-se esclarecer os estudos iniciados por Saito et al. (2015), através da aplicação de um método que pudesse contribuir com o trabalho dos autores, agregando as opiniões de forma conveniente e calculando a probabilidade de ocorrência de determinados eventos.

Os resultados mostraram que às opiniões dos especialistas refletiram em parte os dados históricos e pequenas diferenças são resultado das diferentes condições de operações dos períodos. Como resultado final, foi possível garantir os objetivos inicialmente propostos, apresentando o contexto teórico necessário sobre o tema, de forma a garantir a aplicação em um estudo de caso prático, onde havia a necessidade da quantificação das incertezas a partir da opinião dos especialistas.

7.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A metodologia proposta neste trabalho envolveu uma gama de métodos e técnicas que foram descritas ao longo do texto, mas poderiam incrementar o estudo de caso apresentado no último capítulo. A recomendação para trabalhos futuros seria refazer este estudo considerando uma das seguintes condições:

- 1) Analisar o mesmo estudo de caso, considerando as opiniões dos especialistas na determinação da escala de conversão dos termos linguísticos. Comparar com os resultados obtidos neste trabalho, realizando uma análise crítica;
- 2) Implantar uma árvore de eventos no estudo de caso, relacionado as falhas que levam ao acidente e calculando a probabilidade do evento topo a partir da opinião dos especialistas;
- 3) Realizar o estudo de caso considerando um processo de atualização bayesiano, onde a informação a priori seria dada pela base de dados internacional. Verificar se o processo de atualização garantiu uma redução da probabilidade a posteriori. Se houver, propor alterações nas que visem reduzir a chance de ocorrência de acidentes com base nos resultados.
- 4) Implantar uma árvore de eventos relacionado as falhas que levam à ocorrência do acidente e os fatores contribuintes a partir de uma rede bayesiana. A partir dos

resultados obtidos em termos probabilísticos, determinar quais seriam as medidas a ser implementadas para evitar os eventos mais críticos, em termos de risco (probabilidade x consequência). Realizar um processo de elicitación a partir do método AHP, relacionado as medidas, o custo de implantação e a contribuição que estas trariam casos implantadas, considerando os eventos críticos determinados inicialmente. Finalmente realizar proposições que visem a redução da frequência de acidentes considerando os resultados obtidos no do AHP

REFERÊNCIAS

- ANGERE, S. Coherence as a Heuristic. **Mind**, v. 117, n. 465, p. 1–26, jan. 2008.
- ANSI/IEEE. **Standard reliability data for pump and drivers, valve actuators and valves**. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1984
- APOSTOLAKIS, G.E. et al. Data specialization for plant specific risk studies. **Nuclear Engineering and Design**, v. 56, n. 2, p. 321–329, fev, 1980.
- APOSTOLAKIS, G.E. Data analysis in risk assessments. **Nuclear Engineering and Design**, v. 71, n. 3, p. 375–381, ago. 1982.
- AYYUB, B. M. **Methods for expert-opinion elicitation of probabilities and consequences for corps facilities**. Alexandria: U.S. Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Alexandria, 2000, 105p.
- AYYUB, B. M. **Elicitation of expert opinions for uncertainty and risks**. Boca Raton: CRC Press LCC, 2001. 328p. ISBN 978-0-8493-1087-4.
- AYYUB, B.M.; KLIR, G. J. **Uncertainty modeling and analysis in engineering and the sciences**. Boca Raton: Taylor & Francis Group LLC, 2006. 408 p. ISBN 978-1-58488-644-0.
- AYYUB, B. M.; MCCUEN, R. H. **Probability, statistics, and reliability for engineers scientists**. Boca Raton: CRC Press, 2016. 663 p. ISBN 978-1-4398-9533-7.
- CARVALHO, E.N. **Uma revisão crítica do emprego de banco de dados em análise probabilística de segurança de plantas nucleares e químicas**. 2007. 106 p. Dissertação (Mestrado) – COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- CLEMEN, R. T.; REILLY, T. **Making hard decisions with decision tools**. 3th ed. Ohio: Brooks/Cole, 2014. 848 p. ISBN 978-0-538-79757-3.
- COOKE, R. M. **Experts in uncertainty**. New York: Oxford University Press, 1991. 336 p. ISBN: 978-0-19-506465-0.
- COOKE, R. M.; GOOSSENS, L.L.H.J. TU Delft expert judgment data base. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 93, n. 5, p. 657–674, maio 2008.
- DE FINETTI, B. La prévision : ses lois logiques, ses sources subjectives. **Annales de l'I.H.P.**, 1937 v. 7, n. 1, p.1–68. Disponível em:
<http://www.numdam.org/article/AIHP_1937__7_1_1_0.pdf> Acesso em:17 abr. 2017
- DELBECQ, A. L.; GUSTAFSON, D. H. VAN DE VEN, A. H. **Group techniques for program planning: a guide to nominal group and delphi processes**. Middleton: Green Briar Press, 1986. 174 p. ISBN 978-0-9614511-1-0.
- DODGE, Y. **The Concise Encyclopedia of Statistics**. New York: Springer, 2008. 624 p. ISBN 978-0-387-32833-1.

EMRE, Y. et al. Expert systems with applications fault tree analysis of chemical cargo contamination by using fuzzy approach. **Expert Systems With Applications**, v. 42, n. 12, p. 5232–5244, jul. 2015.

FIRMINO, P.R.A.; SALES FILHO, R. L.M.; DROGUETT, E.L. An expert opinion elicitation method based on Bayesian intervals estimation and computational algorithm: an application to oil refinery risk analysis In: **PROBABILISTIC SAFETY ASSESSMENT AND MANAGEMENT**, 9 , 2008, Hong Kong – China.

FIRMINO, P.R.A.; DROGUETT, E.L. An expert opinion elicitation method based on binary search and Bayesian intervals. **International Journal of Risk Assessment and Management**, v. 18, n. 3/4, p. 336–362, 2015.

FISCHHOFF, B. et al. How safe is safe enough? A psychometric study of attitudes towards technological risks and benefits. **Policy Sciences**, v. 9, n. 2, p. 127–152, abr. 1978.

FORD, R. E.; RICHARDS, S. H.; HUNGERFORD, J.C. **Evaluation of retroreflective markings to increase rail car conspicuity**: Safety of Highway-Railroad Grade Crossings. Cambridge: U.S. Department of Transportation Research and Special Projects Administration – Volpe National Transportation Systems Center , 1998. 228 p.

GALLIANO, A. G. **O método científico: teoria e prática**. São Paulo: Mosaico, 1979.

GOLDSCHMIDT, R.R.; PASSOS, E. **Data mining: um guia prático**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005. ISBN 978-85-352-1877-0.

GOLDSCHMIDT, R. R. **Uma introdução à inteligência computacional: fundamentos, ferramentas e aplicações**. Rio de Janeiro: Instituto Superior de Tecnologia do Rio de Janeiro, 2010. 143 p.

GOMES, É. C. **Análise de confiabilidade humana de procedimentos de radioterapia via redes Bayesianas**. 2011. 110 p. Tese (Doutorado) – COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Helmer, O. Analysis of the future: the delphi method, and the delphi method — an illustration. In: J. Bright (Ed.), **Technological Forecasting for Industry and Government**, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1968.

HSI, M. H.; CHEN, T. C. Aggregation of fuzzy opinions under group decision making. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 79, n. 3, p. 279–285, maio 1996.

IMO - INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO Rule-making Process**, 2013.

KAHN, H.; WIENER, J.A. The year 2000: A Framework for Speculation on the Next Thirty-Three Years. New York: Macmillan, 1967.

KAHNEMAN, D. **Thinking , Fast and Slow**. New York: Farrar, Straus and Giroux, 2011. 352 p. ISBN 978-0-374-27563-1

KAHNEMAN, D.; TVERSKY, A. judgment under uncertainty: heuristics and biases. **Science**, v. 185, n. 4157, p. 1124–1131, 1974.

KENDALL, M. G.; SMITH, B. B. The problem of m rankings. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 10, n. 3, p. 275–287, set. 1939.

LICHTENSTEIN, S.; FISCHHOFF, B.; PHILLIPS, L. D. Calibration of probabilities: the state of the art to 1980. In: KAHNEMAN, D; SLOVIC, P.; TVERSKY, A. **Judgment Under Uncertainty: Heuristics and Biases**. Massachusetts: Cambridge University Press, 1982, p. 306-334

LINSTONE, H. A.; TUROFF, M. **The delphi method - techniques and applications**. 2002. ISBN 978-0-201-04294-8

LU, C.; LAN, J.; WANG, Z. Aggregation of fuzzy opinions under group decision-making based on similarity and distance. **Journal of Systems Science and Complexity**, v. 19, n. 1, p. 63–71, 2006.

MARINS, C. S.; SOUZA, D. DE O.; BARROS, M. DA S. O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais - um estudo. **XLI SBPO- Pesquisa Operacional em Gestão do Conhecimento**, p. 1778–1788, 2009.

MAZZUCHI, T. A.; LINZEY, W. G.; BRUNING, A. A paired comparison experiment for gathering expert judgment for an aircraft wiring risk assessment. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 93, n. 5, p. 722–731, maio 2008.

MEYER, M. A.; BOOKER, J. M. **Eliciting and analyzing expert judgment, a practical guide**. London: Society for Industrial and Applied Mathematics and American Statistical Association, 2001. p. 491. ISBN 978-0-89871-474-6.

MODARRES, M.; KAMINSKIY, M.; KRIVTSOV, V. **Reliability engineering and risk analysis: a practical guide**. New York: CRC PRESS LLC, 1999. 568 p. ISBN 978-0-8247-2000-1.

MODICA, J. E. **Riscos em projetos de docagem de navios petroleiros**. 2009. 121p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MORÉ, J. D. **Aplicação da lógica fuzzy na avaliação da confiabilidade humana nos ensaios não destrutivos por ultra-som**. 2004. 218 p. Tese (Doutorado) – COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

ONISAWA, T. An application of fuzzy concepts to modelling of reliability analysis. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 37, n. 3, p. 267–286, set.1990.

ONISAWA, T. Subjective analysis of system reliability and its analyzer. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 83, n. 2, p. 249–269, out. 1996. Disponível em:

ONISAWA, T.; NISIWAKI, Y. Fuzzy Human Reliability Analysis on the Chernobyl Accident. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 28, n.2, p. 115–127, nov. 1988. Disponível em

ORTEGA, N. R. S. **Aplicação da Teoria de Conjuntos Fuzzy a Problemas da Biomedicina**. 2001. 152p. Tese (Doutorado) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

PETERSON, C.; MILLER, A. Mode, median, and mean as optimal strategies. **Journal of Experimental Psychology**, v. 68, n. 4, p. 363–7, 1964.

PINTO, J. M. O. **Análise de falhas humanas em um sistema digital de uma usina nuclear utilizando uma metodologia híbrida DFM/Atheana/Fuzzy**. 2014. 158 p. Dissertação (Mestrado) – COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

RAMSEY, F. P. Truth and probability. **The Foundations of Mathematics and Other Logical Essays**, v. Ch. VII, n. 1926, p. 156–198, 1931.

RENJITH, V. R. et al. Two-dimensional fuzzy fault tree analysis for chlorine release from a chlor-alkali industry using expert elicitation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 183, n. 1–3, p. 103–110, 2010.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. **Mathematical Modeling**, v. 9, n. 3–5, p. 161–176, 1987.

SAITO, M. S. et al. **Análise estatística dos acidentes na Hidrovia Tietê-Paraná, no período de 2003-2012**. 9º Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior. 2015

SANDRI, S.; CORREA, C. Lógica Nebulosa. **V Escola de Redes Neurais - Conselho Nacional de Redes Neurais**, ITA, São José dos Campos, p. c073-c090, 1999.

SPETZLER, C. S.; STAEL VON HOLSTEIN, C.-A. S. Probability Encoding in Decision Analysis. **Management Science**, v. 22, n. 3, p. 340–358, 1975.

STÂLHANE, T.; MALM, T. Risk assessment—experts vs. lay people. In: Walls, L.; Revie, M; Bedford, T. **Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice**. London: Taylor & Francis Group, 2017. p. 1345-1352.

SUGENO, M. **Fuzzy modelling and control**. 1 ed. ed. Florida, USA: CRC Press, 1999.

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Reactor Safety Study Appendix III Failure Data, WASH-1400 (NUREG- 75/014) (1975)**.

UNITED STATES GOVERNMENT. **Report of the Presidential Commission on the Space Shuttle Accident**. Washington, 1986.

Disponível em: <<http://history.nasa.gov/rogersrep/genindex.htm>>. Acesso em: 27 jan. 2016

WEISZFLOG, W. **Michaelis: moderno dicionário da língua portuguesa**. São Paulo: Melhoramentos, 2004.

YUHUA, D.; DATAO, Y. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**,

v. 18, n. 2, p. 83–88, mar. 2005.

ZADEH, L. Fuzzy Sets as a Basis for Possibility. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 1, p. 3–28, jan. 1978.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338–353, jun, 1965.

APÊNDICE A – SIMILARIDADE ENTRE OS ESPECIALISTAS

Tabela 7.1 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de lesões ao indivíduo decorrente de um acidente na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,00	0,79	0,63	0,79	0,83	1,00	0,63	0,83	1,00	0,79	0,42	0,83
E2	0,79	1,00	0,83	1,00	0,63	0,79	0,83	0,63	0,79	1,00	0,62	0,63
E3	0,63	0,83	1,00	0,83	0,46	0,63	1,00	0,46	0,63	0,83	0,79	0,46
E4	0,79	1,00	0,83	1,00	0,63	0,79	0,83	0,63	0,79	1,00	0,62	0,63
E5	0,83	0,63	0,46	0,63	1,00	0,83	0,46	1,00	0,83	0,63	0,25	1,00
E6	1,00	0,79	0,63	0,79	0,83	1,00	0,63	0,83	1,00	0,79	0,42	0,83
E7	0,63	0,83	1,00	0,83	0,46	0,63	1,00	0,46	0,63	0,83	0,79	0,46
E8	0,83	0,63	0,46	0,63	1,00	0,83	0,46	1,00	0,83	0,63	0,25	1,00
E9	1,00	0,79	0,63	0,79	0,83	1,00	0,63	0,83	1,00	0,79	0,42	0,83
E10	0,79	1,00	0,83	1,00	0,63	0,79	0,83	0,63	0,79	1,00	0,62	0,63
E11	0,42	0,62	0,79	0,62	0,25	0,42	0,79	0,25	0,42	0,62	1,00	0,25
E12	0,83	0,63	0,46	0,63	1,00	0,83	0,46	1,00	0,83	0,63	0,25	1,00

Tabela 7.2 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de danos em embarcações decorrente de um acidente na HTP.

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,00	0,83	0,63	1,00	0,83	1,00		0,83	1,00	0,79	0,79	0,83
E2	0,83	1,00	0,46	0,83	1,00	0,83		1,00	0,83	0,63	0,63	1,00
E3	0,63	0,46	1,00	0,63	0,46	0,63		0,46	0,63	0,83	0,83	0,46
E4	1,00	0,83	0,63	1,00	0,83	1,00		0,83	1,00	0,79	0,79	0,83
E5	0,83	1,00	0,46	0,83	1,00	0,83		1,00	0,83	0,63	0,63	1,00
E6	1,00	0,83	0,63	1,00	0,83	1,00		0,83	1,00	0,79	0,79	0,83
E7												
E8	0,83	1,00	0,46	0,83	1,00	0,83		1,00	0,83	0,63	0,63	1,00
E9	1,00	0,83	0,63	1,00	0,83	1,00		0,83	1,00	0,79	0,79	0,83
E10	0,79	0,63	0,83	0,79	0,63	0,79		0,63	0,79	1,00	1,00	0,63
E11	0,79	0,63	0,83	0,79	0,63	0,79		0,63	0,79	1,00	1,00	0,63
E12	0,83	1,00	0,46	0,83	1,00	0,83		1,00	0,83	0,63	0,63	1,00

Tabela 7.3 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de danos em obras civis e outros decorrente de um acidente na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,00	1,00	0,63	1,00	0,83	0,83	0,42	0,83	1,00	0,79	0,79	0,83
E2	1,00	1,00	0,63	1,00	0,83	0,83	0,42	0,83	1,00	0,79	0,79	0,83
E3	0,63	0,63	1,00	0,63	0,46	0,46	0,79	0,46	0,63	0,83	0,83	0,46
E4	1,00	1,00	0,63	1,00	0,83	0,83	0,42	0,83	1,00	0,79	0,79	0,83
E5	0,83	0,83	0,46	0,83	1,00	1,00	0,25	1,00	0,83	0,63	0,63	1,00
E6	0,83	0,83	0,46	0,83	1,00	1,00	0,25	1,00	0,83	0,63	0,63	1,00
E7	0,42	0,42	0,79	0,42	0,25	0,25	1,00	0,25	0,42	0,62	0,62	0,25
E8	0,83	0,83	0,46	0,83	1,00	1,00	0,25	1,00	0,83	0,63	0,63	1,00
E9	1,00	1,00	0,63	1,00	0,83	0,83	0,42	0,83	1,00	0,79	0,79	0,83
E10	0,79	0,79	0,83	0,79	0,63	0,63	0,62	0,63	0,79	1,00	1,00	0,63
E11	0,79	0,79	0,83	0,79	0,63	0,63	0,62	0,63	0,79	1,00	1,00	0,63
E12	0,83	0,83	0,46	0,83	1,00	1,00	0,25	1,00	0,83	0,63	0,63	1,00

Tabela 7.4 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de danos ambientais decorrente de um acidente na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,00	1,00	0,42	0,83		1,00	0,42	0,83	0,79	0,83	0,79	
E2	1,00	1,00	0,42	0,83		1,00	0,42	0,83	0,79	0,83	0,79	
E3	0,42	0,42	1,00	0,25		0,42	1,00	0,25	0,62	0,25	0,62	
E4	0,83	0,83	0,25	1,00		0,83	0,25	1,00	0,63	1,00	0,63	
E5												
E6	1,00	1,00	0,42	0,83		1,00	0,42	0,83	0,79	0,83	0,79	
E7	0,42	0,42	1,00	0,25		0,42	1,00	0,25	0,62	0,25	0,62	
E8	0,83	0,83	0,25	1,00		0,83	0,25	1,00	0,63	1,00	0,63	
E9	0,79	0,79	0,62	0,63		0,79	0,62	0,63	1,00	0,63	1,00	
E10	0,83	0,83	0,25	1,00		0,83	0,25	1,00	0,63	1,00	0,63	
E11	0,79	0,79	0,62	0,63		0,79	0,62	0,63	1,00	0,63	1,00	
E12												

Tabela 7.5 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo naufrágio na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,00	1,00	0,79	0,79	0,83	0,83	0,42	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
E2	1,00	1,00	0,79	0,79	0,83	0,83	0,42	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
E3	0,79	0,79	1,00	1,00	0,63	0,63	0,62	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
E4	0,79	0,79	1,00	1,00	0,63	0,63	0,62	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
E5	0,83	0,83	0,63	0,63	1,00	1,00	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
E6	0,83	0,83	0,63	0,63	1,00	1,00	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
E7	0,42	0,42	0,62	0,62	0,25	0,25	1,00	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
E8	0,83	0,83	0,63	0,63	1,00	1,00	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
E9	0,83	0,83	0,63	0,63	1,00	1,00	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
E10	0,83	0,83	0,63	0,63	1,00	1,00	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
E11	0,83	0,83	0,63	0,63	1,00	1,00	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
E12	0,83	0,83	0,63	0,63	1,00	1,00	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabela 7.6 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo encalhe na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,00	0,79	0,62	0,79	0,79	0,83	0,83	0,79		0,83	0,62	0,63
E2	0,79	1,00	0,42	1,00	1,00	0,63	0,63	1,00		0,63	0,42	0,83
E3	0,62	0,42	1,00	0,42	0,42	0,79	0,79	0,42		0,79	1,00	0,25
E4	0,79	1,00	0,42	1,00	1,00	0,63	0,63	1,00		0,63	0,42	0,83
E5	0,79	1,00	0,42	1,00	1,00	0,63	0,63	1,00		0,63	0,42	0,83
E6	0,83	0,63	0,79	0,63	0,63	1,00	1,00	0,63		1,00	0,79	0,46
E7	0,83	0,63	0,79	0,63	0,63	1,00	1,00	0,63		1,00	0,79	0,46
E8	0,79	1,00	0,42	1,00	1,00	0,63	0,63	1,00		0,63	0,42	0,83
E9												
E10	0,83	0,63	0,79	0,63	0,63	1,00	1,00	0,63		1,00	0,79	0,46
E11	0,62	0,42	1,00	0,42	0,42	0,79	0,79	0,42		0,79	1,00	0,25
E12	0,63	0,83	0,25	0,83	0,83	0,46	0,46	0,83		0,46	0,25	1,00

Tabela 7.7 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo colisão na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,00	1,00	0,79		0,83	0,83	0,42	0,83	1,00	0,63	0,42	1,00
E2	1,00	1,00	0,79		0,83	0,83	0,42	0,83	1,00	0,63	0,42	1,00
E3	0,79	0,79	1,00		0,63	0,63	0,62	0,63	0,79	0,83	0,62	0,79
E4												
E5	0,83	0,83	0,63		1,00	1,00	0,25	1,00	0,83	0,46	0,25	0,83
E6	0,83	0,83	0,63		1,00	1,00	0,25	1,00	0,83	0,46	0,25	0,83
E7	0,42	0,42	0,62		0,25	0,25	1,00	0,25	0,42	0,79	1,00	0,42
E8	0,83	0,83	0,63		1,00	1,00	0,25	1,00	0,83	0,46	0,25	0,83
E9	1,00	1,00	0,79		0,83	0,83	0,42	0,83	1,00	0,63	0,42	1,00
E10	0,63	0,63	0,83		0,46	0,46	0,79	0,46	0,63	1,00	0,79	0,63
E11	0,42	0,42	0,62		0,25	0,25	1,00	0,25	0,42	0,79	1,00	0,42
E12	1,00	1,00	0,79		0,83	0,83	0,42	0,83	1,00	0,63	0,42	1,00

Tabela 7.8 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo abalroação na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,00	0,79	0,79	0,79	0,83	0,83	0,42	0,83	0,83	0,63	0,42	0,83
E2	0,79	1,00	1,00	1,00	0,63	0,63	0,62	0,63	0,63	0,83	0,62	0,63
E3	0,79	1,00	1,00	1,00	0,63	0,63	0,62	0,63	0,63	0,83	0,62	0,63
E4	0,79	1,00	1,00	1,00	0,63	0,63	0,62	0,63	0,63	0,83	0,62	0,63
E5	0,83	0,63	0,63	0,63	1,00	1,00	0,25	1,00	1,00	0,46	0,25	1,00
E6	0,83	0,63	0,63	0,63	1,00	1,00	0,25	1,00	1,00	0,46	0,25	1,00
E7	0,42	0,62	0,62	0,62	0,25	0,25	1,00	0,25	0,25	0,79	1,00	0,25
E8	0,83	0,63	0,63	0,63	1,00	1,00	0,25	1,00	1,00	0,46	0,25	1,00
E9	0,83	0,63	0,63	0,63	1,00	1,00	0,25	1,00	1,00	0,46	0,25	1,00
E10	0,63	0,83	0,83	0,83	0,46	0,46	0,79	0,46	0,46	1,00	0,79	0,46
E11	0,42	0,62	0,62	0,62	0,25	0,25	1,00	0,25	0,25	0,79	1,00	0,25
E12	0,83	0,63	0,63	0,63	1,00	1,00	0,25	1,00	1,00	0,46	0,25	1,00

Tabela 7.9 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo água aberta na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,00	0,79	0,83	0,63		0,79	0,63		0,79	0,83	0,79	1,00
E2	0,79	1,00	0,63	0,83		1,00	0,83		1,00	0,63	1,00	0,79
E3	0,83	0,63	1,00	0,46		0,63	0,46		0,63	1,00	0,63	0,83
E4	0,63	0,83	0,46	1,00		0,83	1,00		0,83	0,46	0,83	0,63
E5												
E6	0,79	1,00	0,63	0,83		1,00	0,83		1,00	0,63	1,00	0,79
E7	0,63	0,83	0,46	1,00		0,83	1,00		0,83	0,46	0,83	0,63
E8												
E9	0,79	1,00	0,63	0,83		1,00	0,83		1,00	0,63	1,00	0,79
E10	0,83	0,63	1,00	0,46		0,63	0,46		0,63	1,00	0,63	0,83
E11	0,79	1,00	0,63	0,83		1,00	0,83		1,00	0,63	1,00	0,79
E12	1,00	0,79	0,83	0,63		0,79	0,63		0,79	0,83	0,79	1,00

Tabela 7.10 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de uma explosão decorrente de um acidente na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,00	0,83				0,83	0,42		1,00	0,83	0,79	0,83
E2	0,83	1,00				1,00	0,25		0,83	1,00	0,63	1,00
E3												
E4												
E5												
E6	0,83	1,00				1,00	0,25		0,83	1,00	0,63	1,00
E7	0,42	0,25				0,25	1,00		0,42	0,25	0,62	0,25
E8												
E9	1,00	0,83				0,83	0,42		1,00	0,83	0,79	0,83
E10	0,83	1,00				1,00	0,25		0,83	1,00	0,63	1,00
E11	0,79	0,63				0,63	0,62		0,79	0,63	1,00	0,63
E12	0,83	1,00				1,00	0,25		0,83	1,00	0,63	1,00

Tabela 7.11 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um incêndio decorrente de um acidente na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,00	1,00	1,00	0,83	0,83	0,83	0,42	0,83	0,83	0,83	0,79	1,00
E2	1,00	1,00	1,00	0,83	0,83	0,83	0,42	0,83	0,83	0,83	0,79	1,00
E3	1,00	1,00	1,00	0,83	0,83	0,83	0,42	0,83	0,83	0,83	0,79	1,00
E4	0,83	0,83	0,83	1,00	1,00	1,00	0,25	1,00	1,00	1,00	0,63	0,83
E5	0,83	0,83	0,83	1,00	1,00	1,00	0,25	1,00	1,00	1,00	0,63	0,83
E6	0,83	0,83	0,83	1,00	1,00	1,00	0,25	1,00	1,00	1,00	0,63	0,83
E7	0,42	0,42	0,42	0,25	0,25	0,25	1,00	0,25	0,25	0,25	0,62	0,42
E8	0,83	0,83	0,83	1,00	1,00	1,00	0,25	1,00	1,00	1,00	0,63	0,83
E9	0,83	0,83	0,83	1,00	1,00	1,00	0,25	1,00	1,00	1,00	0,63	0,83
E10	0,83	0,83	0,83	1,00	1,00	1,00	0,25	1,00	1,00	1,00	0,63	0,83
E11	0,79	0,79	0,79	0,63	0,63	0,63	0,62	0,63	0,63	0,63	1,00	0,79
E12	1,00	1,00	1,00	0,83	0,83	0,83	0,42	0,83	0,83	0,83	0,79	1,00

Tabela 7.12 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo variação na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,00	0,83	1,00	0,83	0,83	1,00	0,63	0,83	0,83	1,00	0,83	
E2	0,83	1,00	0,83	1,00	1,00	0,83	0,46	1,00	1,00	0,83	1,00	
E3	1,00	0,83	1,00	0,83	0,83	1,00	0,63	0,83	0,83	1,00	0,83	
E4	0,83	1,00	0,83	1,00	1,00	0,83	0,46	1,00	1,00	0,83	1,00	
E5	0,83	1,00	0,83	1,00	1,00	0,83	0,46	1,00	1,00	0,83	1,00	
E6	1,00	0,83	1,00	0,83	0,83	1,00	0,63	0,83	0,83	1,00	0,83	
E7	0,63	0,46	0,63	0,46	0,46	0,63	1,00	0,46	0,46	0,63	0,46	
E8	0,83	1,00	0,83	1,00	1,00	0,83	0,46	1,00	1,00	0,83	1,00	
E9	0,83	1,00	0,83	1,00	1,00	0,83	0,46	1,00	1,00	0,83	1,00	
E10	1,00	0,83	1,00	0,83	0,83	1,00	0,63	0,83	0,83	1,00	0,83	
E11	0,83	1,00	0,83	1,00	1,00	0,83	0,46	1,00	1,00	0,83	1,00	
E12												

Tabela 7.13 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo arribada na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,00	0,79	0,83		0,83	1,00		0,83	0,83	1,00	0,83	0,83
E2	0,79	1,00	0,63		0,63	0,79		0,63	0,63	0,79	0,63	0,63
E3	0,83	0,63	1,00		1,00	0,83		1,00	1,00	0,83	1,00	1,00
E4												
E5	0,83	0,63	1,00		1,00	0,83		1,00	1,00	0,83	1,00	1,00
E6	1,00	0,79	0,83		0,83	1,00		0,83	0,83	1,00	0,83	0,83
E7												
E8	0,83	0,63	1,00		1,00	0,83		1,00	1,00	0,83	1,00	1,00
E9	0,83	0,63	1,00		1,00	0,83		1,00	1,00	0,83	1,00	1,00
E10	1,00	0,79	0,83		0,83	1,00		0,83	0,83	1,00	0,83	0,83
E11	0,83	0,63	1,00		1,00	0,83		1,00	1,00	0,83	1,00	1,00
E12	0,83	0,63	1,00		1,00	0,83		1,00	1,00	0,83	1,00	1,00

Tabela 7.14 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo alijamento na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,00	1,00	0,79	0,83		0,79			0,83	0,83	0,83	0,83
E2	1,00	1,00	0,79	0,83		0,79			0,83	0,83	0,83	0,83
E3	0,79	0,79	1,00	0,63		1,00			0,63	0,63	0,63	0,63
E4	0,83	0,83	0,63	1,00		0,63			1,00	1,00	1,00	1,00
E5												
E6	0,79	0,79	1,00	0,63		1,00			0,63	0,63	0,63	0,63
E7												
E8												
E9	0,83	0,83	0,63	1,00		0,63			1,00	1,00	1,00	1,00
E10	0,83	0,83	0,63	1,00		0,63			1,00	1,00	1,00	1,00
E11	0,83	0,83	0,63	1,00		0,63			1,00	1,00	1,00	1,00
E12	0,83	0,83	0,63	1,00		0,63			1,00	1,00	1,00	1,00

Tabela 7.15 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo avaria/defeito na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,00										1,00	
E2												
E3												
E4												
E5												
E6												
E7												
E8												
E9												
E10												
E11	1,00										1,00	
E12												

Tabela 7.16 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade dos fatores humanos contribuírem na ocorrência de um acidente na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,00	0,42	0,62	0,62	0,25	0,79	1,00		0,25	0,79	1,00	0,25
E2	0,42	1,00	0,79	0,79	0,83	0,63	0,42		0,83	0,63	0,42	0,83
E3	0,62	0,79	1,00	1,00	0,63	0,83	0,62		0,63	0,83	0,62	0,63
E4	0,62	0,79	1,00	1,00	0,63	0,83	0,62		0,63	0,83	0,62	0,63
E5	0,25	0,83	0,63	0,63	1,00	0,46	0,25		1,00	0,46	0,25	1,00
E6	0,79	0,63	0,83	0,83	0,46	1,00	0,79		0,46	1,00	0,79	0,46
E7	1,00	0,42	0,62	0,62	0,25	0,79	1,00		0,25	0,79	1,00	0,25
E8												
E9	0,25	0,83	0,63	0,63	1,00	0,46	0,25		1,00	0,46	0,25	1,00
E10	0,79	0,63	0,83	0,83	0,46	1,00	0,79		0,46	1,00	0,79	0,46
E11	1,00	0,42	0,62	0,62	0,25	0,79	1,00		0,25	0,79	1,00	0,25
E12	0,25	0,83	0,63	0,63	1,00	0,46	0,25		1,00	0,46	0,25	1,00

Tabela 7.17 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade dos fatores materiais contribuírem na ocorrência de um acidente na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,00	0,25	1,00	0,62		0,25	0,79		0,25	0,79	1,00	0,42
E2	0,25	1,00	0,25	0,63		1,00	0,46		1,00	0,46	0,25	0,83
E3	1,00	0,25	1,00	0,62		0,25	0,79		0,25	0,79	1,00	0,42
E4	0,62	0,63	0,62	1,00		0,63	0,83		0,63	0,83	0,62	0,79
E5												
E6	0,25	1,00	0,25	0,63		1,00	0,46		1,00	0,46	0,25	0,83
E7	0,79	0,46	0,79	0,83		0,46	1,00		0,46	1,00	0,79	0,63
E8												
E9	0,25	1,00	0,25	0,63		1,00	0,46		1,00	0,46	0,25	0,83
E10	0,79	0,46	0,79	0,83		0,46	1,00		0,46	1,00	0,79	0,63
E11	1,00	0,25	1,00	0,62		0,25	0,79		0,25	0,79	1,00	0,42
E12	0,42	0,83	0,42	0,79		0,83	0,63		0,83	0,63	0,42	1,00

Tabela 7.18 – Similaridade entre os especialistas em relação à possibilidade dos fatores operacionais contribuírem na ocorrência de um acidente na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,00	0,63	1,00	0,63	1,00	0,63	0,83		0,63	0,83	0,62	0,63
E2	0,63	1,00	0,63	1,00	0,63	1,00	0,46		1,00	0,46	0,25	1,00
E3	1,00	0,63	1,00	0,63	1,00	0,63	0,83		0,63	0,83	0,62	0,63
E4	0,63	1,00	0,63	1,00	0,63	1,00	0,46		1,00	0,46	0,25	1,00
E5	1,00	0,63	1,00	0,63	1,00	0,63	0,83		0,63	0,83	0,62	0,63
E6	0,63	1,00	0,63	1,00	0,63	1,00	0,46		1,00	0,46	0,25	1,00
E7	0,83	0,46	0,83	0,46	0,83	0,46	1,00		0,46	1,00	0,79	0,46
E8												
E9	0,63	1,00	0,63	1,00	0,63	1,00	0,46		1,00	0,46	0,25	1,00
E10	0,83	0,46	0,83	0,46	0,83	0,46	1,00		0,46	1,00	0,79	0,46
E11	0,62	0,25	0,62	0,25	0,62	0,25	0,79		0,25	0,79	1,00	0,25
E12	0,63	1,00	0,63	1,00	0,63	1,00	0,46		1,00	0,46	0,25	1,00

APÊNDICE B – SIMILARIDADE MÉDIA, SIMILARIDADE RELATIVA E COEFICIENTE DE CONSENSO

Tabela 7.19 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de lesões ao indivíduo decorrente de um acidente na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
$\overline{S_R}(E_i)$	0,777	0,777	0,687	0,777	0,687	0,777	0,687	0,687	0,777	0,777	0,496	0,687	8,593
$RA(E_u)$	0,098	0,098	0,087	0,098	0,087	0,098	0,087	0,087	0,098	0,098	0,063	0,087	1,087
$CC(E_u)$	0,091	0,085	0,086	0,082	0,086	0,112	0,086	0,071	0,085	0,097	0,065	0,098	1,043

Tabela 7.20 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de danos em embarcações decorrente de um acidente na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
$\overline{S_R}(E_i)$	0,855	0,805	0,602	0,855	0,805	0,855		0,805	0,855	0,751	0,751	0,805	8,742
$RA(E_u)$	0,108	0,101	0,076	0,108	0,101	0,108		0,101	0,108	0,095	0,095	0,101	1,101
$CC(E_u)$	0,100	0,090	0,084	0,090	0,097	0,123		0,080	0,093	0,100	0,083	0,110	1,051

Tabela 7.21 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de danos em obras civis e outros decorrente de um acidente na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
$\overline{S_R}(E_i)$	0,815	0,815	0,619	0,815	0,755	0,755	0,428	0,755	0,815	0,740	0,740	0,755	8,804
$RA(E_u)$	0,101	0,101	0,077	0,101	0,094	0,094	0,053	0,094	0,101	0,092	0,092	0,094	1,094
$CC(E_u)$	0,093	0,087	0,081	0,084	0,089	0,110	0,069	0,074	0,087	0,094	0,079	0,101	1,047

Tabela 7.22 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de danos ambientais decorrente de um acidente na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
$\overline{S_R}(E_i)$	0,769	0,769	0,473	0,695		0,769	0,473	0,695	0,723	0,695	0,723		6,784
$RA(E_u)$	0,113	0,113	0,070	0,102		0,113	0,070	0,102	0,107	0,102	0,107		1,000
$CC(E_u)$	0,109	0,101	0,087	0,092		0,135	0,087	0,085	0,098	0,111	0,094		1,000

Tabela 7.23 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade da ocorrência de um acidente do tipo naufrágio na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
$\overline{S_R}(E_i)$	0,804	0,804	0,690	0,690	0,834	0,834	0,349	0,834	0,834	0,834	0,834	0,834	9,174
$RA(E_u)$	0,096	0,096	0,083	0,083	0,100	0,100	0,042	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	1,100
$CC(E_u)$	0,090	0,084	0,084	0,075	0,092	0,113	0,063	0,077	0,086	0,098	0,083	0,104	1,050

Tabela 7.24 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade da ocorrência de um acidente do tipo encalhe na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
$\overline{S_R}(E_i)$	0,755	0,734	0,592	0,734	0,734	0,738	0,738	0,734		0,738	0,592	0,585	7,673
$RA(E_u)$	0,106	0,104	0,083	0,104	0,104	0,104	0,104	0,104		0,104	0,083	0,082	1,082
$CC(E_u)$	0,099	0,091	0,087	0,087	0,097	0,120	0,098	0,081		0,104	0,077	0,100	1,041

Tabela 7.25 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um acidente do tipo colisão na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
$\overline{S_R}(E_i)$	0,776	0,776	0,713		0,693	0,693	0,484	0,693	0,776	0,630	0,484	0,776	7,490
$RA(E_u)$	0,115	0,115	0,106		0,103	0,103	0,072	0,103	0,115	0,094	0,072	0,115	1,115
$CC(E_u)$	0,103	0,096	0,098		0,097	0,119	0,081	0,081	0,096	0,099	0,071	0,116	1,058

Tabela 7.26 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade da ocorrência de um acidente do tipo abalroação na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
$\overline{S_R}(E_i)$	0,728	0,728	0,728	0,728	0,698	0,698	0,485	0,698	0,698	0,637	0,485	0,698	8,009
$RA(E_u)$	0,100	0,100	0,100	0,100	0,095	0,095	0,066	0,095	0,095	0,087	0,066	0,095	1,095
$CC(E_u)$	0,092	0,086	0,092	0,083	0,090	0,111	0,075	0,075	0,084	0,092	0,066	0,102	1,048

Tabela 7.27 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade da ocorrência de um acidente do tipo água aberta na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
$\overline{S_R}(E_i)$	0,788	0,834	0,677	0,723		0,834	0,723		0,834	0,677	0,834	0,788	7,713
$RA(E_u)$	0,114	0,120	0,098	0,104		0,120	0,104		0,120	0,098	0,120	0,114	1,114
$CC(E_u)$	0,106	0,102	0,098	0,091		0,134	0,101		0,102	0,105	0,099	0,120	1,057

Tabela 7.28 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de uma explosão decorrente de um acidente na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
$\overline{S_R}(E_i)$	0,792	0,792				0,792	0,352		0,792	0,792	0,674	0,792	5,779
$RA(E_u)$	0,159	0,159				0,159	0,071		0,159	0,159	0,135	0,159	1,159
$CC(E_u)$	0,139	0,130				0,168	0,095		0,130	0,147	0,114	0,156	1,079

Tabela 7.29 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade de ocorrência de um incêndio decorrente de um acidente na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
$\overline{S_R}(E_i)$	0,838	0,838	0,838	0,838	0,838	0,838	0,345	0,838	0,838	0,838	0,687	0,838	9,408
$RA(E_u)$	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,040	0,098	0,098	0,098	0,080	0,098	1,098
$CC(E_u)$	0,091	0,085	0,091	0,082	0,091	0,112	0,062	0,076	0,085	0,097	0,073	0,103	1,049

Tabela 7.30 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade da ocorrência de um acidente do tipo variação na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
$\overline{S_R}(E_i)$	0,863	0,880	0,863	0,880	0,880	0,863	0,527	0,880	0,880	0,863	0,880		9,257
$RA(E_u)$	0,093	0,095	0,093	0,095	0,095	0,093	0,057	0,095	0,095	0,093	0,095		1,000
$CC(E_u)$	0,094	0,088	0,094	0,085	0,095	0,118	0,076	0,078	0,088	0,101	0,085		1,000

Tabela 7.31 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade da ocorrência de um acidente do tipo arribada na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
$\overline{S_R}(E_i)$	0,866	0,682	0,903		0,903	0,866		0,903	0,903	0,866	0,903	0,903	8,700
$RA(E_u)$	0,111	0,087	0,116		0,116	0,111		0,116	0,116	0,111	0,116	0,116	1,116
$CC(E_u)$	0,105	0,086	0,108		0,108	0,130		0,090	0,100	0,112	0,097	0,122	1,058

Tabela 7.32 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade da ocorrência de um acidente do tipo alijamento na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
$\overline{S_R}(E_i)$	0,844	0,844	0,715	0,865		0,715			0,865	0,865	0,865	0,865	7,444
$RA(E_u)$	0,128	0,128	0,109	0,132		0,109			0,132	0,132	0,132	0,132	1,132
$CC(E_u)$	0,118	0,111	0,109	0,108		0,136			0,112	0,128	0,108	0,136	1,066

Tabela 7.33 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade da ocorrência um acidente do tipo avaria/defeito na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
$\overline{S_R}(E_i)$	1,000										1,000		2,000
$RA(E_u)$	0,500										0,500		1,000
$CC(E_u)$	0,530										0,470		1,000

Tabela 7.34 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade dos fatores humanos contribuírem na ocorrência de um acidente na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
$\overline{S_R}(E_i)$	0,600	0,659	0,721	0,721	0,576	0,705	0,600		0,576	0,705	0,600	0,576	7,040
$RA(E_u)$	0,093	0,102	0,112	0,112	0,089	0,109	0,093		0,089	0,109	0,093	0,089	1,089
$CC(E_u)$	0,093	0,093	0,100	0,095	0,091	0,117	0,093		0,082	0,105	0,079	0,098	1,045

Tabela 7.35 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade dos fatores materiais contribuírem na ocorrência de um acidente na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
$\overline{S_R}(E_i)$	0,597	0,571	0,597	0,690		0,571	0,690		0,571	0,690	0,597	0,644	6,219
$RA(E_u)$	0,107	0,102	0,107	0,124		0,102	0,124		0,102	0,124	0,107	0,116	1,116
$CC(E_u)$	0,597	0,571	0,597	0,690		0,571	0,690		0,571	0,690	0,597	0,644	6,219

Tabela 7.36 – Similaridades média, relativa e coeficiente de consenso entre as opiniões dos especialistas em relação à possibilidade dos fatores operacionais contribuírem na ocorrência de um acidente na HTP

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Σ
$\overline{S}_R(E_i)$	0,743	0,705	0,743	0,705	0,743	0,705	0,660		0,705	0,660	0,471	0,705	7,543
$RA(E_u)$	0,109	0,103	0,109	0,103	0,109	0,103	0,096		0,103	0,096	0,069	0,103	1,103
$CC(E_u)$	0,101	0,093	0,098	0,091	0,101	0,114	0,095		0,089	0,099	0,067	0,105	1,052