Análise de Risco em Sistemas de Transporte de Hidrogénio

GONÇALO RODRIGUES SALVADO
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Manutenção e Produção

Orientador:
Doutor José Augusto da Silva Sobral

Júri:
Presidente: Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes
Vogais:
Doutor Luís António de Andrade Ferreira
Doutor José Augusto da Silva Sobral

Dezembro de 2024

Análise de Risco em Sistemas de Transporte de Hidrogénio

GONÇALO RODRIGUES SALVADO
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Manutenção e Produção

Orientador:
Doutor José Augusto da Silva Sobral, ISEL/IPL

Júri:
Presidente: Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes, ISEL/IPL
Vogais:
Doutor Luís António de Andrade Ferreira, FEUP
Doutor José Augusto da Silva Sobral, ISEL/IPL

Dezembro de 2024

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu reconhecimento ao meu professor e orientador Professor Doutor José Augusto da Silva Sobral, pela sua total disponibilidade, esforço e dedicação ao longo de todo este período de orientação.

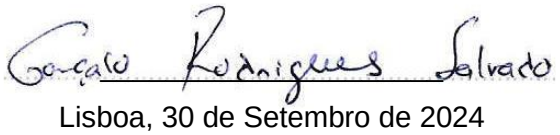
Um especial agradecimento aos meus amigos e companheiros de curso Bruno Pinto, Pedro Rosado e Ricardo Caetano, não esquecendo também os amigos de longa data que sempre me apoiaram em todas as fases mais difíceis e que não deixaram de o fazer nesta fase da minha vida.

Por último, e o mais importante agradecimento, vai para a minha família, mãe, pai, irmã, irmão e namorada, que foram sem dúvida uma das principais fontes de apoio e motivação.

Declaração de integridade

Declaro que esta dissertação é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor



Lisboa, 30 de Setembro de 2024

Análise de Risco em Sistemas de Transporte de Hidrogénio

Resumo

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito de conclusão do curso de Mestrado de Engenharia Mecânica – Perfil de Manutenção e Produção.

Sob uma orientação bem definida, a principal motivação deste trabalho consistiu na elaboração de uma Análise de Riscos em Sistemas de Transporte de Hidrogénio, com especial foco no transporte de hidrogénio através de *pipelines*. Numa primeira fase foram abordados métodos de produção, tipos de armazenamento e transporte de hidrogénio, dando especial importância aos *pipelines*, como estes são projetados, quais os componentes constituintes, etapas de construção, fase de operação e manutenção e aspetos relacionados com a segurança. Seguidamente foi apresentado um estudo exemplificativo que visa avaliar a quantidade ótima de hidrogénio injetável numa rede existente de *pipelines* de hidrogénio, terminando com a apresentação dos maiores riscos e desafios no transporte de hidrogénio em *pipelines* existentes.

Posteriormente, foi abordado o tema do risco de uma forma genérica, seguindo as normas ISO 31000 e ISO 31010, com o objetivo de identificar as técnicas e ferramentas existentes para a sua aplicação de modo a mitigar os riscos inerentes a um sistema e/ou processos.

Por fim foi elaborada uma FMEA *(Failure Mode and Effects Analysis)* aplicada a *pipelines* de hidrogénio, com o principal objetivo de identificar modos de falha, causas e consequências.

Palavras-chave: Hidrogénio, Gasodutos, Risco, FMEA.

Risk Analysis for Hydrogen Transport Systems

Abstract

This dissertation was developed within the scope of completion of the Master's degree in Mechanical Engineering - Maintenance and Production Profile.

Under a well defined orientation, the main motivation of this work was to develop a Risk Analysis for Hydrogen Transport Systems, with special focus on the transport of hydrogen through pipelines. In a first phase, production methods, types of hydrogen storage and transportation were addressed, giving special importance to the pipelines, how they are designed, which components, construction stages, operation and maintenance phases and safety related aspects. Then, an illustrative study was presented that aims to evaluate the optimal amount of hydrogen injectable in an existing network of hydrogen pipelines, ending with the presentation of the major risks and challenges in the transport of hydrogen in existing pipelines.

Subsequently, the risk issue was addressed in a generic way, following the ISO 31000 and ISO 31010 standards, with the objective of identifying existing techniques and tools for their application to mitigate the risks inherent to a system and/ or processes.

Finally, a FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) was developed applied to hydrogen pipelines, with the main objective of identifying failure modes, causes and consequences.

Keywords: Hydrogen, Pipelines, Risk, FMEA.

Lista de Símbolos e de siglas

AHP *- Analytic Hierarchy Process*

ALARP *- As Low As Reasonably Practicable*

BIA *- Business Impact Analysis*

CDF *- Cumulative Distribution Function*

CM *- Cloud Model*

CVaR *- Conditional Value at Risk*

DPIA *- Data Protection Impact Analysis*

ES *- Expected Shortfall*

ETA *- Event Tree Analysis*

FEM *- Finite Element Method*

FMEA *- Failure Mode and Effects Analysis*

FMECA *- Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*

FTA *- Fault Tree Analysis*

GA-BP *- Genetic Algorithm optimized Back Propagation*

H_2 *- Hidrogénio*

HACCP *- Hazard Analysis and Critical Control Point*

HAZOP *- Hazard and Operability Study*

HE *- Hydrogen Embrittlement*

HIC *- Hydrogen-Induced Cracking*

HRA *- Human Reliability Analysis*

ISO *- International Standard Organisation*

LH_2 *- Hidrogénio Líquido*

LOPA *- Layers of Protection Analysis*

MCA *- Multi Criteria Analysis*

PDF *- Probability Density Function*

PIA *- Privacy Impact Analysis*

QRA *- Qualitative Risk Assessment*

RCM *- Reliability Centred Maintenance*

RGPD *- Regulamento de Proteção de Dados da União Europeia*

RPN *- Risk Priority Number*

SFAIRP *- So Far As Is Reasonably Practicable*

SWIFT *- Structured Whatif Technique*

TOPSIS *- Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*

UM *- Unidades Monetárias*

VAB *- Valor Atual dos Benefícios*

VAC *- Valor Atual dos Custos*

VAL *- Valor Atual Líquido*

VaR *- Value at Risk*

Índice

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 ENQUADRAMENTO 1

1.2 OBJETIVO 2

1.3 ESTRUTURA 3

2 HIDROGÉNIO 5

2.1 PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO 5

2.1.1 Reformação por vapor 5

2.1.2 Eletrólise da água 6

2.2 ARMAZENAMENTO DO HIDROGÉNIO 7

2.2.1 Gás comprimido a elevadas pressões (CGH_2) 7

2.2.2 Hidrogénio líquido (LH_2) 8

2.2.3 Dissolvido em substâncias sólidas 8

2.3 TIPOS DE TRANSPORTE DE HIDROGÉNIO 9

2.3.1 Pipelines 9

2.3.1.1 Projeto 9

2.3.1.2 Componentes 10

2.3.1.3 Construção 10

2.3.1.4 Operação e manutenção 11

2.3.1.5 Segurança 12

2.3.2 Gás comprimido a elevadas pressões (CGH2) 12

2.3.3 Hidrogénio líquido (LH_2) 12

2.3.4 Transportadores de hidrogénio 13

2.3.5 Mistura de hidrogénio em pipelines de gás natural 13

2.3.6 Comparação dos vários tipos de transporte de hidrogénio 14

2.4 INJEÇÃO DE HIDROGÉNIO EM *PIPELINES* DE GÁS NATURAL 14

2.4.1 Diferenças das propriedades do hidrogénio e do gás natural 15

2.4.2 Estudo exemplificativo 16

3 RISCO 21

3.1 PRINCÍPIOS 21

3.2 ESTRUTURA 22

3.3 PROCESSO 25

3.4 TÉCNICAS DE APRECIAÇÃO DO RISCO 29

3.4.1 Técnicas para obter pontos de vista 31

3.4.2 Técnicas para identificar riscos (B2) 34

3.4.3 Técnicas para determinar fontes, causas e fatores de risco (B3) 39

3.4.4 Técnicas para análise de controlos 41

3.4.5 Técnicas para compreender consequências e probabilidade 44

3.4.6 Técnicas para análise de dependências e interações 53
3.4.7 Técnicas que fornecem uma medida de risco 55
3.4.8 Técnicas para avaliar a significância do risco 56
3.4.9 Técnicas para selecionar entre opções 61
3.4.10 Técnicas para registo e relatórios 65
3.5 APLICABILIDADE DAS TÉCNICAS AO PROCESSO DA NORMA ISO 31000 68
4 CASO PRÁTICO 71
4.1 ENQUADRAMENTO 71
4.2 DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DA FMEA 73
4.2.1 Diagrama de blocos 73
4.2.2 Elaboração das tabelas de ocorrência, detetabilidade, severidade e grau de risco 75
4.2.3 Aplicação da FMEA a pipelines de hidrogénio e sistemas interligados 76
4.2.4 Análise de resultados 80
4.3 MAIORES RISCOS DO TRANSPORTE DE HIDROGÉNIO EM *PIPELINES* EXISTENTES 81
4.3.1 Análise de resultados 88
5 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO 89
5.1 CONCLUSÕES 89
5.2 TRABALHO FUTURO 90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 93

Índice de figuras

Figura 2.1 - Produção de hidrogénio a partir da eletrólise da água. Fonte: (Gomes, 2022) 7

Figura 2.2 - Pig no interior de um *pipeline*. Fonte: (Nigen, 2020) 11

Figura 2.3 - Rede de pipelines de transporte de Gás Natural. Fonte: (Arya et al., 2023) 16

Figura 2.4 - Pressão nos vários nós da tubagem alterando a quantidade de Hidrogénio (mole %) presente no Gás Natural. Fonte: (Arya et al., 2023) 17

Figura 2.5 - Quantidade de gás transportada ao longo da tubagem alterando a quantidade de Hidrogénio (mole %) presente no Gás Natural. Fonte: (Arya et al., 2023) 18

Figura 2.6 - Rendimento dos compressores. Fonte: (Arya et al., 2023) 18

Figura 2.7 - Consumo de combustível dos compressores. Fonte: (Arya et al., 2023) 19

Figura 3.1 - Relações entre as componentes da estrutura para gerir o risco. Fonte: Adaptado da norma ISO 31000:2018 23

Figura 3.2 - Processo de gestão do risco. Fonte: Adaptado da norma ISO 31000:2018 26

Figura 3.3 - Técnicas de avaliação de risco Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019 31

Figura 3.4 - Exemplo de um diagrama Ishikawa (espinha de peixe) 41

Figura 3.5 - Exemplo de um diagrama de Bow-Tie. Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019 42

Figura 3.6 - Exemplo de Rede Bayesiana aplicada a uma análise probabilística de acidentes em pipelines de gás natural. Fonte: (Wu et al., 2017) 45

Figura 3.7 - Exemplo de diagrama de causa-consequência. Fonte: Adaptado de Hayrton (2012). 48

Figura 3.8 - Exemplo de uma análise de árvore de eventos. Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019 49

Figura 3.9 - Exemplo de uma Análise de Árvore de Falhas. Fonte: Adaptado de (Microsoft, s.d.) 50

Figura 3.10 - Exemplo de diagrama de Markov. Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019 51

Figura 3.11 - VaR e CVaR de uma possível perda num portefólio. Fonte: norma ISO 31010:2019 56

Figura 3.12 - Diagrama ALARP. Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019 57

Figura 3.13 - Exemplo de um diagrama F-N. Fonte: Norma ISO 31010:2019 58

Figura 3.14 - Diagrama de Pareto. Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019 59

Figura 3.15 - Exemplo de matriz de consequência/probabilidade. Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019 66

Figura 3.16 - Função de distribuição de probabilidade e função de distribuição cumulativa. Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019 67

Figura 4.1 - Diagrama de blocos funcionais 73

Figura 4.2 - Gráfico de análise do grau de risco. 80

Figura 4.3 - Gráfico de análise do grau de risco. 88

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Comparação dos vários métodos de transporte de hidrogénio. 14
Tabela 2.2 - Comparação das propriedades do Metano, Etano, Propano e Hidrogénio. Fonte: Adaptado de Arya et al. (2023) 15
Tabela 3.1 - Exemplo de uma FMEA 35
Tabela 3.2 - Exemplos de palavras-guia e os seus significados Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019. 37
Tabela 3.3 - Exemplo de matriz de Markov. Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019 52
Tabela 3.4 - Exemplo de uma matriz de jogo. Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019 63
Tabela 3.5 - Aplicabilidade das técnicas ao processo da norma ISO 31000. Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019 69
Tabela 4.1 - Descrição funcional dos sistemas constituintes dos *pipelines* de hidrogénio 74
Tabela 4.2 - Descrição funcional dos principais componentes. 74
Tabela 4.3 - Índice de severidade aplicado ao caso de estudo. 75
Tabela 4.4 - Índice de ocorrência aplicado ao caso de estudo 75
Tabela 4.5 - Índice de detetabilidade aplicado ao caso de estudo. 76
Tabela 4.6 - Classificação do grau de risco aplicado ao caso de estudo (RPN). 76
Tabela 4.7 - FMEA aplicada a *pipelines* de hidrogénio e sistemas interligados 77
Tabela 4.8 - Nº de modos de falha identificados por grau de risco. 80
Tabela 4.9 - Aplicação da FMEA à injeção de hidrogénio em *pipelines* existentes de gás natural 86
Tabela 4.10 - Nº de modos de falha identificados por grau de risco. 88

1 Introdução

1.1 Enquadramento

O hidrogénio é um gás que começa a ganhar um grande relevo como meio de combustível, apresentando-se como alternativa aos combustíveis fósseis comuns, podendo ser produzido a partir de fontes de energia renovável, resultando na obtenção de hidrogénio verde. A existência de *pipelines* simplifica o seu transporte pelo que se torna necessário e extremamente importante caracterizar os modos de falha que podem afetar os sistemas ou componentes deste tipo de infraestruturas com maior frequência.

A introdução de hidrogénio na rede de gás natural, seja ela de transporte ou de distribuição, introduz desafios importantes relacionados com a integridade destes sistemas. Por outro lado, a fiabilidade assume importância relevante no que diz respeito à disponibilidade dos sistemas integrantes neste processo que se tornará mais complexo devido à variedade da composição existente em cada ponto da rede.

Existem vários fatores que ressalvam a sua importância no contexto atual, nomeadamente:

Transição energética e descarbonização - O hidrogénio é considerado uma solução-chave para a transição energética global, especialmente em setores onde a eletrificação direta é difícil, como a indústria pesada (aço, cimento, química) e o transporte de longa distância (navios, aviões, camião). O hidrogénio verde, produzido por eletrólise utilizando energia renovável, não emite dióxido de carbono (CO_2) durante a sua produção, tornando-o uma opção de combustível com baixa pegada de carbono. Isso torna-o crucial para cumprir metas de descarbonização, reduzir a dependência de combustíveis fósseis e enfrentar as mudanças climáticas.

Armazenamento de energia - Uma das principais vantagens do hidrogénio é a sua capacidade de funcionar como um meio de armazenamento de energia. Este pode armazenar grandes quantidades de energia renovável (como solar e eólica) quando há excesso de produção e libertá-la quando a procura é maior, contribuindo para a estabilização de redes elétricas e compensando a intermitência dessas fontes.

Mobilidade e transporte limpo - O hidrogénio também é promissor no setor da mobilidade, através de células de combustível que convertem hidrogénio em eletricidade para abastecer veículos, o que resulta numa emissão zero de poluentes na sua utilização, sendo uma alternativa aos veículos elétricos tradicionais movidos a baterias, especialmente em aplicações de longa distância e veículos pesados.

Diversificação de fontes energéticas - Ao utilizar o hidrogénio, os países podem reduzir a sua dependência de combustíveis fósseis e diversificar as suas fontes de energia. Isso contribuirá para a segurança energética, pois pode ser produzido a partir de várias fontes, como eletrólise da água (quando há acesso a energia renovável), reformulação de gás natural, ou processos biológicos.

Desenvolvimento económico e industrial - A economia do hidrogénio está a gerar novas oportunidades industriais e de pesquisa, promovendo o desenvolvimento de tecnologias avançadas. Os países que investem em infraestrutura de produção, transporte e uso de hidrogénio estão na vanguarda de uma nova economia global de baixo carbono, criando empregos em setores emergentes.

Versatilidade - O hidrogénio é um vetor energético versátil. Além de ser um combustível, pode ser utilizado como matéria-prima em várias indústrias (ex. fertilizantes, produtos químicos) e como fonte de calor em processos industriais. Essa flexibilidade aumenta ainda mais sua importância estratégica.

Economia circular - O hidrogénio também pode desempenhar um papel na economia circular, permitindo a reciclagem de carbono (através de tecnologias de captura de carbono) e a produção de combustíveis sintéticos, ajudando a criar sistemas energéticos mais sustentáveis.

Apesar do seu grande potencial, o uso generalizado do hidrogénio enfrenta desafios como os altos custos de produção (especialmente do hidrogénio verde), a necessidade de novas infraestruturas (como estações de reabastecimento e redes de transporte de hidrogénio) e a eficiência energética comparada com outras fontes. Neste sentido, o presente estudo faz todo o sentido, ao estudar aplicações ligadas ao transporte e armazenamento deste tipo de energia.

1.2 Objetivo

O presente trabalho reveste-se de uma grande atualidade e pretende realizar uma caracterização dos modos de falha, causas e consequências recorrendo a aplicação de uma FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) a *pipelines* de transporte de hidrogénio, com especial ênfase no aproveitamento de gasodutos existentes para a realização do referido transporte.

O estudo dos modos de falha e das suas implicações na gestão da integridade dos gasodutos é um importante contributo para a fiabilidade e disponibilidade destes sistemas.

1.3 Estrutura

O presente documento está dividido em cinco capítulos. O primeiro e atual capítulo é o introdutório, onde é descrito e enquadrado o problema alvo de estudo ao longo do trabalho, e é onde está também definido o objetivo principal.

Segue-se o segundo capítulo, que aborda o tema do hidrogénio e tem início com a apresentação das diferentes formas de produção, armazenamento e transporte de hidrogénio. Neste capítulo, para além da identificação dos vários tipos de transporte, é aprofundado o transporte em *pipelines*, onde são apresentadas breves definições do que é um *pipeline*, como se projeta, variáveis e características técnicas essenciais que devem ser tidas em consideração, componentes constituintes de uma rede genérica de *pipelines*, etapas de construção, operação e manutenção, aspetos de segurança a ter em conta, terminando com um quadro comparativo dos vários tipos de transporte de hidrogénio. O segundo capítulo termina com a apresentação de um estudo exemplificativo de injeção de hidrogénio em pipelines de gás natural, onde são apresentadas as diferenças das propriedades do hidrogénio e do gás natural, passando à demonstração de resultados obtidos no estudo com o objetivo de determinar a quantidade máxima admissível de hidrogénio circulante numa rede de gás natural existente.

O terceiro capítulo é o mais extenso uma vez que engloba de uma forma abrangente e genérica o Risco, segundo a norma NP ISO 31000. Tem início com a apresentação da definição de Risco e a distinção entre Perigo e Risco. De seguida são apresentados os princípios que uma organização deverá ter aliada à abordagem estratégica da gestão do risco, uma vez que uma boa gestão do risco cria e protege o valor, deve fazer parte integrante dos processos organizacionais e das tomadas de decisão, e são enunciados vários outros aspetos relevantes que resultam de uma correta gestão do risco. Na fase seguinte deste capítulo é abordada a estrutura que deve ser desenvolvida em torno da gestão do risco para que esta seja eficaz. Estando definida a estrutura surge a implementação do processo. Nesta fase são enunciadas as diferentes etapas necessárias para elaborar o processo de gestão de risco e a forma como se correlacionam entre si, desde o estabelecimento do contexto, a comunicação e consulta, identificação, análise, avaliação e tratamento do risco. No quarto ponto deste capítulo são detalhadas as várias técnicas de apreciação do risco. A escolha da técnica bem como o método de aplicação devem ser ajustados ao contexto da organização e fornecer as informações necessárias às partes interessadas. A norma NP ISO 31010

divide as técnicas em dez categorias e identifica quais as mais aplicáveis a cada etapa do processo de gestão do risco. Este capítulo termina com um quadro resumo onde através de uma escala quantitativa com as classificações A - Aplicável, FA - Fortemente Aplicável ou NA - Não Aplicável, são classificadas cada uma das técnicas de apreciação do risco relativamente à aplicabilidade destas às diferentes fases do processo de avaliação do risco, isto é, fase de identificação do risco, consequências, probabilidade, nível de risco e avaliação do risco.

O quarto capítulo foi reservado para a apresentação de uma FMEA aplicada a *pipelines* de hidrogénio e uma segunda FMEA, menos extensa, aplicada à injeção de hidrogénio em *pipelines* existentes de gás natural. Primeiramente foi feito um breve enquadramento do objetivo da realização da FMEA e foram apresentados estudos e análises elaboradas por outros autores centradas no transporte hidrogénio. Na segunda parte deste capítulo foi apresentado um projeto genérico de uma rede de *pipelines*, os seus principais sistemas, subsistemas e componentes mais relevantes na sua operação. De seguida foram elaboradas as tabelas de ocorrência, detetabilidade e severidade para classificação dos riscos identificados por forma a possibilitar o cálculo do RPN (*Risk Priority Number*). Posteriormente foi realizada a FMEA, onde foram apresentados os possíveis modos de falha associados a cada um dos sistemas, subsistemas e componentes, bem como as possíveis consequências que advenham das mesmas. Nesta fase foi possível identificar o grau de risco para cada modo de falha, evidenciando por ordem de prioridade quais os que carecem que sejam tomadas medidas mais imediatas. Foram também enunciadas possíveis medidas a serem tomadas para mitigar cada um dos modos de falha. Na terceira parte deste capítulo foram ainda abordados os maiores riscos do transporte de hidrogénio em *pipelines* existentes de gás natural, terminando com a apresentação de uma FMEA, onde foram identificados os principais modos de falha, causas e consequências associados à mistura de hidrogénio com gás natural.

Por fim, o quinto capítulo sumariza as conclusões, com base nos resultados obtidos ao longo da dissertação, quer no estudo exemplificativo apresentado no capítulo 2.4 sobre a injeção de hidrogénio em *pipelines* de gás natural quer na apresentação de duas FMEA no capítulo 4, terminando com o trabalho futuro a desenvolver.

2 Hidrogénio

O hidrogénio (H_2) é o elemento químico mais abundante no universo. Surge em primeiro lugar na tabela periódica, e é também o mais leve e mais simples, com um átomo composto por apenas um eletrão que orbita em torno de um protão. Este, está presente no ar que respiramos, no corpo humano, nas plantas, nos animais, na água, e nas estrelas e planetas que constituem o universo. Tem como principais características o facto de ser mais leve do que ar, incolor, inodoro e extremamente inflamável, tornando-se uma das maiores esperanças mundiais em termos energéticos.

2.1 Produção de hidrogénio

2.1.1 Reformação por vapor

Para que o hidrogénio se torne uma fonte de energia sustentável, é essencial que a sua produção se faça a partir de recursos renováveis, no entanto, mais de 95% do hidrogénio produzido atualmente provem de fontes não renováveis, baseados em combustíveis fósseis.

Existem várias formas de produzir hidrogénio, no entanto, o processo de reformação por vapor é o mais usado atualmente para produção em escala industrial. Nesta técnica, o hidrogénio obtém-se a partir do aquecimento de um combustível fóssil a altas temperaturas, nomeadamente a partir do aquecimento de gás natural. O contacto com vapor de água provoca a separação das moléculas de hidrogénio, libertando também dióxido de carbono (CO_2). Também é comum utilizar-se biomassa como combustível, visto ser uma fonte rica em metano (CH_4).

Este processo é realizado em duas fases. A primeira reação ocorre a pressão moderada (entre 20 e 30 bar) e a cerca de 900 °C com a utilização de um catalisador de níquel. Inicialmente o gás natural é dessulfurado, pois o enxofre atua como um contaminante para os catalisadores. O produto inicial é composto por H_2, CH_4, monóxido de carbono (CO), água e dióxido de carbono (CO_2) obtido pela oxidação do CO. Posteriormente, o CO sofre uma reação de conversão exotérmica denominada *Water-*

gas shift que produz uma molécula extra de H_2 em relação à primeira reação. No geral, pode-se obter até 75% de hidrogénio e 25% de dióxido de carbono (CO_2).

Na última etapa o H_2 é separado do CO_2 e posteriormente é purificado. Abaixo está a Equação 2.1 que traduz a reação geral de reformação por vapor:

$$CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2 \quad (2.1)$$

2.1.2 Eletrólise da água

Ao passar corrente elétrica por água num eletrolisador, esta decompõe-se nos seus elementos constituintes: oxigénio e hidrogénio. Este processo, se recorrer a eletricidade de fontes renováveis, origina H_2 verde. O eletrolisador funciona sempre com um cátodo, que "concentra" as bolhas de hidrogénio, e um ânodo, onde se junta o oxigénio.

Existem três tipos de eletrolisadores:

- **Alcalino**, que recorre a hidróxido de sódio e de potássio na água para acelerar a separação das moléculas, a uma temperatura de 80 ºC.
- **PEM**, com uma membrana de polímero a separar as duas partes de cada célula do eletrolisador. A 80 ºC também, os protões de hidrogénio atravessam a membrana para um dos lados, ficando o oxigénio do outro.
- **SOEC**, que recorre a uma divisória em óxido sólido, um material cerâmico que é atravessado pelo oxigénio para o lado do ânodo, ficando o hidrogénio na metade inicial. Esta técnica funciona a temperaturas mais altas, 500 ºC.

Um dos fatores preocupantes na utilização exaustiva deste método é o consumo elevado de eletricidade e água. Para produzir 1 kg de H_2 são necessários 9 l de água pura e cerca de 55 kWh de eletricidade, considerando uma eficiência do eletrolisador superior a 60%, pelo que a redução do seu preço final depende do desenvolvimento da tecnologia e do constante crescimento das energias renováveis. O maior problema neste momento é a capacidade de fazer escalar a indústria que fabrica os eletrolisadores, lembrando que 70% do custo do hidrogénio eletrolítico está na energia usada na sua produção. De acordo com a EDP (Energias de Portugal, S.A), "*os sistemas existentes têm dimensões da ordem das dezenas de MW e estamos apostados em começar a construir eletrolisadores com centenas e até milhares de MW*" (EDP, 2021).

A Figura 2.1 mostra de forma simplificada o processo de produção de hidrogénio a partir da eletrólise da água.

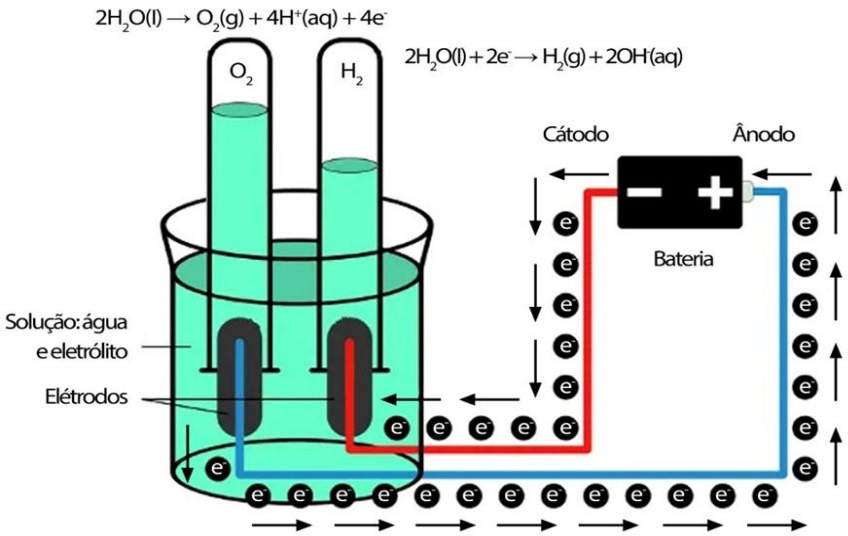


Figura 2.1 - Produção de hidrogénio a partir da eletrólise da água.
Fonte: (Gomes, 2022)

2.2 Armazenamento do hidrogénio

As tecnologias atuais permitem armazenar grandes quantidades de hidrogénio de três formas:

- Gás comprimido a elevadas pressões.
- Hidrogénio Líquido.
- Dissolvido em substâncias sólidas.

2.2.1 Gás comprimido a elevadas pressões (CGH_2)

A maneira mais fácil de diminuir o volume de um gás, a temperaturas constantes, é aumentar sua pressão. O hidrogénio armazenado sob a forma de gás comprimido em alta pressão com recurso a cilindros ou tanques pressurizados de matérias como o alumínio, aço ou plástico, é o método preferencial onde a solicitação de hidrogénio é variável e não muito alta, nomeadamente em unidades de pilha de células de combustível, nos autocarros, automóveis, em habitações, estabelecimentos comerciais e industriais.

A pressão de compressão do hidrogénio pode andar entre 200 e 250 bar para tanques de armazenamento de 50 l, normalmente de alumínio ou carbono (grafite), podendo ser usados em pequenos projetos industriais ou nos transportes.

Para utilização a larga escala, a pressão de compressão varia entre 200 e 700 bar e a densidade do gás aumenta à medida que a pressão aumenta.

Armazenar o hidrogénio como gás comprimido tem como principais vantagens a simplicidade e a inexistência de perdas energéticas com o passar do tempo (após a compressão do H_2).

2.2.2 Hidrogénio líquido (LH_2)

Para que se consiga armazenar grandes quantidades de hidrogénio num volume pequeno, o hidrogénio é transformado para o estado líquido reduzindo a sua temperatura abaixo dos -252,87 °C, podendo ser armazenado em câmaras criogénicas com elevadas capacidades.

À temperatura de -252,87 °C e uma pressão de 1,013 bar, o hidrogénio líquido tem uma densidade próxima de 71 kg/m3. A essa pressão, 5 kg de hidrogénio podem ser armazenados num tanque de 75 l.

A conversão do hidrogénio do estado gasoso para o estado líquido requer uma grande quantidade de energia sendo um processo caro (cerca de 40% da energia contida no hidrogénio pode ser perdida), pois como já foi referido só se mantém líquido a temperaturas inferiores a -252,87 °C. O hidrogénio líquido é consideravelmente mais denso que o gasoso, e é muito mais volumoso que a gasolina. Quando se comparam sistemas com iguais quantidades de energia, o sistema de hidrogénio pode ser 4 a 10 vezes mais pesado do que um tanque a gasolina equivalente.

Esta é uma solução que, ao contrário do armazenamento sob a forma de gás comprimido a elevadas pressões, não apresenta tantos riscos em caso da existência de fuga no tanque. Isto é, devido ao facto de o hidrogénio estar uma temperatura muito baixa e para que se comece a libertar para atmosfera a sua temperatura terá de aumentar, promovendo a evaporação a um ritmo consideravelmente lento (Air Liquide, 2022).

2.2.3 Dissolvido em substâncias sólidas

Os hidretos metálicos, os nanotubos e nanofibras de carbono, as microesferas de vidro e polímeros (plásticos) permitem o armazenamento do hidrogénio a baixas pressões (< 10 bar). Armazenar hidrogénio na forma sólida são técnicas que envolvem mecanismos de absorção ou adsorção de hidrogénio por um material.

Um exemplo é formar hidretos metálicos sólidos através da reação do hidrogénio com certas ligas metálicas. Essa absorção é resultado da combinação química reversível do hidrogénio com os átomos que compõem esses materiais. Os materiais mais promissores são compostos de magnésio e hidretos de alumínio. Esses metais libertam o hidrogénio quando aquecidos em baixa pressão e em alta temperatura. Mas, apenas uma pequena massa de hidrogénio pode ser armazenada nesses materiais, o que atualmente é a principal desvantagem dessa tecnologia.

Antes de considerar aplicações em larga escala, também é importante dominar certos parâmetros-chave, como cinética (desempenho da célula) e a temperatura e pressão dos ciclos de carga e descarga de hidrogénio nesses materiais.

2.3 Tipos de transporte de hidrogénio

O hidrogénio pode ser transportado através de diversos meios, dependendo de fatores como distância, quantidade e aplicação específica. Os principais sistemas para transporte de hidrogénio incluem gasodutos, transporte de gás comprimido, transporte de hidrogénio liquefeito e transportadores químicos. Cada sistema tem as suas vantagens e limitações, e a escolha do método de transporte está relacionada com questões económicas, técnicas e de segurança. A Tabela 2.1 resume as principais características de cada um dos seguintes métodos de transporte de hidrogénio:

2.3.1 *Pipelines*

Define-se por *pipelines* os dutos, normalmente subterrâneos, responsáveis por transportar e distribuir fluídos em longas distâncias. Abordando este tema do ponto de vista energético, os fluídos mais comuns de transportar em longa distância ao longo deste sistema são: petróleo, derivados de petróleo, gás natural e hidrogénio. No entanto, também se aplica a outro tipo de fluídos para distâncias mais curtas, como é o caso de água, cerveja, lama e esgoto.

Os gasodutos de hidrogénio são a maneira mais eficiente de transportar grandes volumes de hidrogénio em curtas e médias distâncias, com custos operacionais relativamente baixos após a instalação. Este método é semelhante aos sistemas de gasodutos de gás natural, mas requer materiais especiais e precauções de segurança devido ao pequeno tamanho molecular do hidrogénio e ao potencial de fragilização.

2.3.1.1 Projeto

Projetar um *pipeline* inclui a seleção da rota percorrida pela tubagem, determinação do rendimento e velocidade operacional, cálculo do gradiente de pressão, seleção de equipamentos e acessórios, determinação da espessura e material do tubo, e a realização de análises económicas de engenharia e análises de mercado. Em cada projeto destes, torna-se obrigatório ter em consideração a segurança, preocupações ambientais e regulamentações governamentais.

Tipicamente os *pipelines* são feitos de aço ou plástico, com diâmetro interno que varia entre 4 a 48 in, o que equivale a 100 a 1220 mm respetivamente. A maioria dos *pipelines* são instalados a cerca de 0,91 m a 1,83 m de profundidades. Para proteger a rede de possíveis impactos ou choques, fenómenos de abrasão e corrosão, existem

soluções como revestir a mesma com madeira, betão, areia, polietileno de alta densidade ou através de proteções catódicas.

2.3.1.2 Componentes

As redes de *pipelines* são compostas por vários componentes e equipamentos que, ao operarem em conjunto, permitem o transporte de fluídos do ponto A ao ponto B, dos quais se destacam:

- Estação de injeção: também conhecida como "*inlet station*", localizada no início da rede, é aqui que o fluído a transportar é injetado para o interior do pipeline.
- Compressores / bombas: se o produto a transportar se encontrar no estado líquido são utilizadas bombas, já se se tratar de gases recorre-se ao uso de compressores. Este tipo de dispositivo encontra-se localizado em pontos da rede que são definidos através da topografia do terreno, do tipo de fluído e das condições operacionais pretendidas.
- Estação intermédia: permite à operadora entregar parte do fluído a outras redes que a intersetam.
- Estação de bloqueio: com recurso a válvulas de bloqueio a operadora tem a capacidade de isolar segmentos da rede para proceder a trabalhos de manutenção. Normalmente, estas estão localizadas a cada 48km de extensão da linha.
- Estação reguladora: permite à operadora libertar parte da pressão interior da linha.
- Estação final de entrega: também conhecida como "*outlet station*", é a estação terminal onde o produto é distribuído para a rede do consumidor.

Para além destas estações e dispositivos principais, existem uma grande variedade de sensores que permitem monitorizar em tempo real as condições de operação no interior da tubagem, permitindo assim identificar possíveis roturas. Em instalações especiais que obriguem a um maior rigor no controlo da temperatura do fluído, são instalados sistemas de refrigeração.

2.3.1.3 Construção

A construção de *pipelines* envolve várias etapas essenciais, das quais se destacam: levantamento de rotas, escavação ou abertura de valas, transporte de tubos, conexões e outros materiais para o local, amarração dos tubos ao longo da vala, dobragem de tubos de aço no terreno para se adequar à topografia local, aplicação de revestimentos em tubos de aço, união de tubos, verificação de possíveis falhas de soldadura ou fugas nas juntas e, por fim, cobrir as valas e restaurar o terreno à sua

aparência original. Para *pipelines* mais longos, a construção é feita em segmentos para que um segmento do *pipeline* seja concluído antes de iniciar a construção do próximo. Assim, o tempo que um determinado local é perturbado pelas atividades de construção será minimizado. A construção de qualquer segmento de um *pipeline* consideravelmente longo, normalmente é concluída num prazo médio de seis meses e, muitas vezes, em muito menos tempo. Para redes de dimensão mais reduzida, estas são construídas em dias.

Quando há a necessidade de atravessar um rio, a tubagem é amarrada a pontes ou, recorrendo a máquinas de perfuração, estas são instaladas no subsolo do rio. (Britannica, 2019)

2.3.1.4 Operação e manutenção

Os *pipelines* modernos de longa distância são monitorizados automaticamente com recurso a sistemas informáticos através de computadores localizados na sede da operadora. É possível monitorizar a pressão, o caudal e outros parâmetros em vários locais ao longo da rede, e enviar comandos para o terreno para controlar a operação das válvulas e bombas. Por vezes, também a intervenção manual é necessária para modificar a operação automática, como quando diferentes lotes de combustíveis são direcionados para diferentes tanques de armazenamento temporário, ou quando o sistema deve ser desligado ou reiniciado (Britannica, 2019).

Nas operações de manutenção e inspeção, com recurso à utilização de dispositivos denominados por *"pigs"*, é possível não só localizar e limpar as superfícies internas da tubagem, mas também detetar anomalias causados por impactos com a estrutura, fenómenos de corrosão, propagação de fissuras e outros danos mecânicos. Contêm componentes eletrónicos e sensores ultrassónicos que permitem medir parâmetros como o diâmetro, a curvatura, a espessura, pressão interior, perda de metal e temperatura. Estes dispositivos são lançados numa estação de injeção e são recebidos numa outra estação a montante da linha (Nigen, 2020).

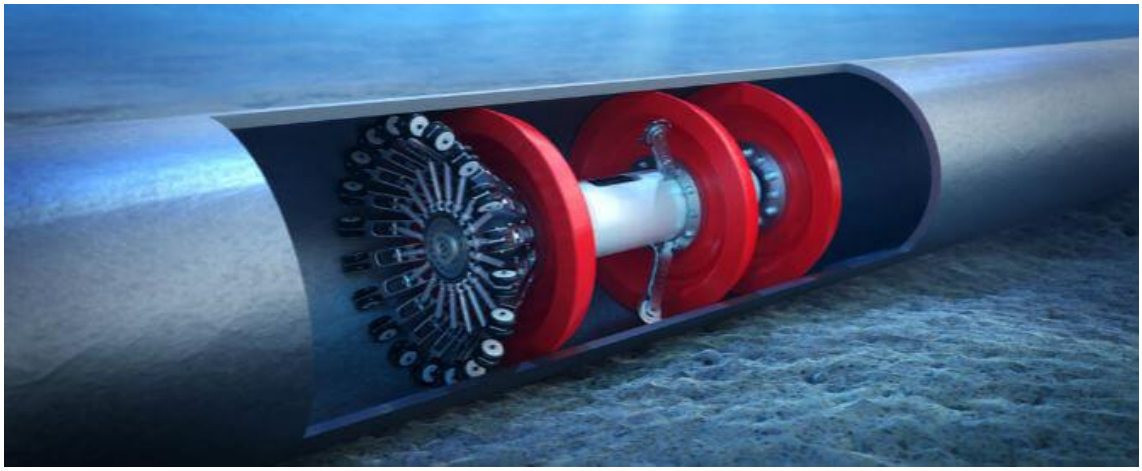


Figura 2.2 - Pig no interior de um *pipeline*. Fonte: (Nigen, 2020)

Nos Estados Unidos da América, estima-se que cerca de metade dos acidentes em *pipelines* são causados por terceiros. A segunda principal causa de falha é a corrosão, causada pelo contacto da tubagem com o solo e com o fluído que circula no interior da tubagem.

2.3.1.5 Segurança

A segurança dos *pipelines* depende em grande parte dos materiais transportados. *Pipelines* que transportem água ou que recorrem à água para transportar produtos sólidos, não apresentam risco de explosão em caso de rotura. No caso de materiais como o petróleo, embora não oferecendo perigo de explosão quando existe alguma rotura na tubagem, poluem as águas e o solo do meio envolvente. Os produtos que oferecem maiores riscos de explosão prendem-se essencialmente com os gases e líquidos mais voláteis, como é o caso do gás natural e da gasolina, merecendo assim maiores considerações em matéria de segurança. No entanto, a maneira mais segura e económica de transportar este tipo de produtos é através dos *pipelines* (Consol Energy, 2015).

2.3.2 Gás comprimido a elevadas pressões (CGH2)

O hidrogénio pode ser comprimido, entre 200-700 bar, e transportado como um gás em cilindros de alta pressão, reboques tubulares ou camiões. Este método permite uma maior flexibilidade na distribuição, sendo mais adequado para quantidades menores e distâncias mais curtas, até locais como postos de abastecimento ou até pequenos consumidores industriais.

Apresenta limitações comparativamente ao transporte em *pipelines* de hidrogénio e ao transporte de hidrogénio líquido, como o processo de compressão com uso intensivo de energia e preocupações de segurança relacionadas a altas pressões.

2.3.3 Hidrogénio líquido (LH_2)

Este método é mais eficiente para transporte de longa distância quando comparando com o gás comprimido porque o hidrogénio liquefeito tem uma densidade de energia maior. É normalmente transportado em camiões, navios ou ferrovia.

Por outro lado, requer um elevado consumo de energia para liquefação (requer cerca de 30% do conteúdo energético do hidrogénio), existem perdas por ebulição devido à transferência de calor e existe a necessidade do transporte ter de ser feito em tanques criogénicos altamente isolados. O seu transporte é normalmente feito para atender a projetos internacionais de comércio de hidrogénio ou missões espaciais

2.3.4 Transportadores de hidrogénio

O hidrogénio pode ser armazenado quimicamente em compostos que são mais fáceis de transportar e manusear do que gás ou hidrogénio líquido puro. Esses transportadores podem libertar hidrogénio posteriormente quando necessário.

- Amoníaco (NH3): O hidrogénio é combinado com azoto para formar o amoníaco, que pode ser transportada mais facilmente e posteriormente dissociado para libertar hidrogénio. O amoníaco também tem uma alta densidade de hidrogénio.
- Transportadores de hidrogénio orgânico líquido (LOHCs): O hidrogénio é quimicamente ligado a uma molécula transportadora líquida (por exemplo, tolueno), que pode ser transportada e, posteriormente, o hidrogénio é libertado por meio de um processo de desidrogenação.
- Metanol: O hidrogénio pode ser armazenado como metanol, um líquido à temperatura ambiente, que pode ser facilmente transportado e, posteriormente, convertido novamente em hidrogénio.

Este tipo de transporte apresenta perdas de energia nos processos de conversão, e é necessário ter uma infraestrutura química adicional, pelo que a sua eficiência dependerá do transportador. No caso do transporte de hidrogénio utilizando amoníaco, este tem sido explorado para o comércio internacional entre continentes, nomeadamente entre a Austrália e o Japão.

2.3.5 Mistura de hidrogénio em *pipelines* de gás natural

O hidrogénio pode ser misturado com o gás natural e transportado por gasodutos de gás natural existentes. Este método tem sido explorado como uma forma de introduzir gradualmente o hidrogénio na infraestrutura de gás existente.

É uma solução de baixo custo, uma vez que utiliza uma infraestrutura já existente, e a mistura gasosa normalmente contém entre 5 e 20% de hidrogénio por volume sem modificações significativas nos *pipelines*, tendo sido testada em vários projetos piloto na Europa, Austrália e EUA.

As suas principais limitações são o facto de haver uma concentração limitada de hidrogénio na mistura gasosa, devido a restrições dos materiais e operacionais dos *pipelines* existentes, existe perda de energia devido à mistura e a necessidade de separação no ponto de uso final se for necessário hidrogénio puro.

2.3.6 Comparação dos vários tipos de transporte de hidrogénio

A Tabela 2.1 resume as principais características de cada tipo de transporte de hidrogénio. Da sua análise, é possível concluir que o transporte mais eficiente é através de *pipelines*, ainda que apresente um custo inicial elevado das infraestruturas necessárias, apresenta um baixo custo operacional, uma elevada capacidade de transporte e alta eficiência energética. A mistura de hidrogénio em *pipelines* existentes de gás natural é também um excelente método de transporte de hidrogénio, uma vez que existe um aproveitamento de uma infraestrutura já existente, ainda que careça de algumas adaptações devido às propriedades do hidrogénio.

Tabela 2.1 - Comparação dos vários métodos de transporte de hidrogénio.

Método	Capacidade	Distância	Infraestrutura	Custo	Eficiência energética	Aplicações
Pipelines	Alta	Média	Elevado custo de instalação. Baixo custo de operação.	Elevado custo inicial. Baixo custo de operação e manutenção.	Alta	Centros industriais. Distribuição regional.
Gás comprimido	Baixa	Curta	Reboque tubular	Médio/Elevado	Moderada	Estações de abastecimento. Pequenos consumidores industriais.
Hidrogénio líquido	Média/Alta	Longa	Tanques criogénicos e camiões especializados	Elevado	Baixa/Moderada	Transportes de longa distância. Missões espaciais. Exportação.
Transportadores químicos	Depende do transportador	Longa	Processos de conversão e reconversão complexos	Depende do transportador	Baixa/Moderada	Comércio internacional.
Mistura de hidrogénio em *pipelines* de gás natural	Média	Longa	*Pipelines* existentes de gás natural	Baixo	Moderada	Integração gradual em sistemas de gás natural. Armazenamento de longa duração.

2.4 Injeção de hidrogénio em *pipelines* de gás natural

O hidrogénio surgirá como um meio de transporte eficaz e energeticamente eficiente, que depende mais das fontes de energia renováveis (Arya et al., 2023). O hidrogénio pode ser produzido em instalações com infraestruturas extensas e é distribuído posteriormente até distâncias consideravelmente curtas ou até centenas de quilómetros para os utilizadores finais. Pode ser transportado de várias formas, seja através de *pipelines*, transportes terrestres, ferroviários ou navais, sendo os *pipelines* o meio de transporte mais fiável e o que assegura o melhor desempenho. O hidrogénio pode ser introduzido na rede energética para aliviar a procura de energia em massa. Para tal torna-se necessário desenvolver melhorias significativas nas redes de *pipelines*

existentes para que sejam adequadas ao transporte desta nova fonte de energia renovável.

2.4.1 Diferenças das propriedades do hidrogénio e do gás natural

A Tabela 2.2 mostra as propriedades dos constituintes do gás natural (Metano, Etano e Propano) e as do hidrogénio. Devido às diferenças existentes nas propriedades de ambos os gases, um sistema desenvolvido para transporte de gás natural não pode ser efetivamente utilizado para o transporte exclusivo de hidrogénio, uma vez que o nível de hidrogénio no gás natural afeta as propriedades de combustão, as difusões do material e altera as propriedades moleculares e térmicas da mistura gasosa. Um gás com maior teor de hidrogénio afeta o material da tubagem, potencia o seu envelhecimento e afeta o desempenho do consumidor final. Portanto quando o hidrogénio é injetado na rede de gás natural, os riscos associados são agravados, uma vez que a infraestrutura foi projetada apenas para o transporte de gás natural. Estima-se que existem 5 a 20 vezes mais acidentes relacionados com a utilização de hidrogénio do que com gás natural.

Mohtadi-Bonab (2022) realizou um estudo a diferentes parâmetros de hidrogénio que possam causar falhas por fadiga em *pipelines* de aço. O estudo permitiu descobrir que vários parâmetros como a microestrutura do aço, frequência de carga, temperatura do ambiente de teste, pressão do hidrogénio e o fator de intensidade de tensões podem influenciar o fenómeno de fadiga em *pipelines* de aço. Foi também descoberto que a microestrutura de perlite retarda a taxa de crescimento de fendas por fadiga. O crescimento de fendas por fadiga acelera com o aumento da pressão do hidrogénio e com a interação de cargas cíclicas.

Tabela 2.2 - Comparação das propriedades do Metano, Etano, Propano e Hidrogénio. Fonte: Adaptado de Arya et al. (2023)

Propriedades	Metano	Etano	Propano	Hidrogénio
Massa molar (g/mol)	16,04	30,07	44,1	2,02
Temperatura crítica (K)	190,65	305,4	369,8	33,2
Pressão Crítica (bar)	45,4	48,8	42,5	13,15
Volume crítico (cm^3mol^{-1})	99,2	148,3	99,2	64,3
Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)	50	47,8	46,35	120
Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	55,5	51,9	50,35	142
Coeficiente de difusão (m^2/s)	$1,6*10^{-5}$	$1,453*10^{-5}$	$1,204*10^{-5}$	$6,1*10^{-5}$
Fator acêntrico	0,008	0,099	0,153	-0,215
Capacidade térmica a pressão constante e 25 ºC (J/molK)	35,5	52,84	74,916	28,8
Coeficiente de expansão adiabática (Cp/Cv)	1,31	1,186	1,126	1,4
Temperatura adiabática de chama (K)	2236	2222	2250	2483
Temperatura de autoignição (K)	580	515	455	500

No transporte de gás para longas distâncias, os *pipelines* são feitos em aço, já no abastecimento local por vezes existem tubagens poliméricas. A fragilização que o hidrogénio confere pode provocar o aparecimento de pequenas fendas que vão crescendo exponencialmente ao longo do tempo.

Têm sido desenvolvidos vários estudos para apurar as condições de funcionamento ideais e a quantidade de hidrogénio que pode ser transportado em conjunto com o gás natural nas infraestruturas existentes de forma segura.

2.4.2 Estudo exemplificativo

A Figura 2.3 ilustra uma rede de *pipelines* de transporte de gás que serviu de caso de estudo (Arya et al., 2023), com o objetivo de encontrar a quantidade aceitável de hidrogénio que pode ser adicionada à rede. A rede tem início no nó N0 e estende-se até à zona onde é feita a entrega do gás no nó N17. Possui duas estações de compressão, cada uma equipada com três compressores centrífugos que fazem aumentar a pressão do gás. O gás natural que flui no gasoduto tem como constituintes primários o Metano (70%), Etano (25%) e Propano (5%). Por apresentar esta concentração de Metano trata-se de um gás natural pobre.

A rede ilustrada na Figura 2.3 apresenta quarenta e seis variáveis, incluindo dezoito de pressão, quinze de caudal mássico, seis para o consumo de combustível nos compressores, seis de velocidade de rotação dos compressores e uma variável para a quantidade de hidrogénio injetado nos *pipelines* de gás natural. As pressões de entrada e saída permanecem fixas entre os limites de 58,8 bar e 61,2 bar respetivamente.

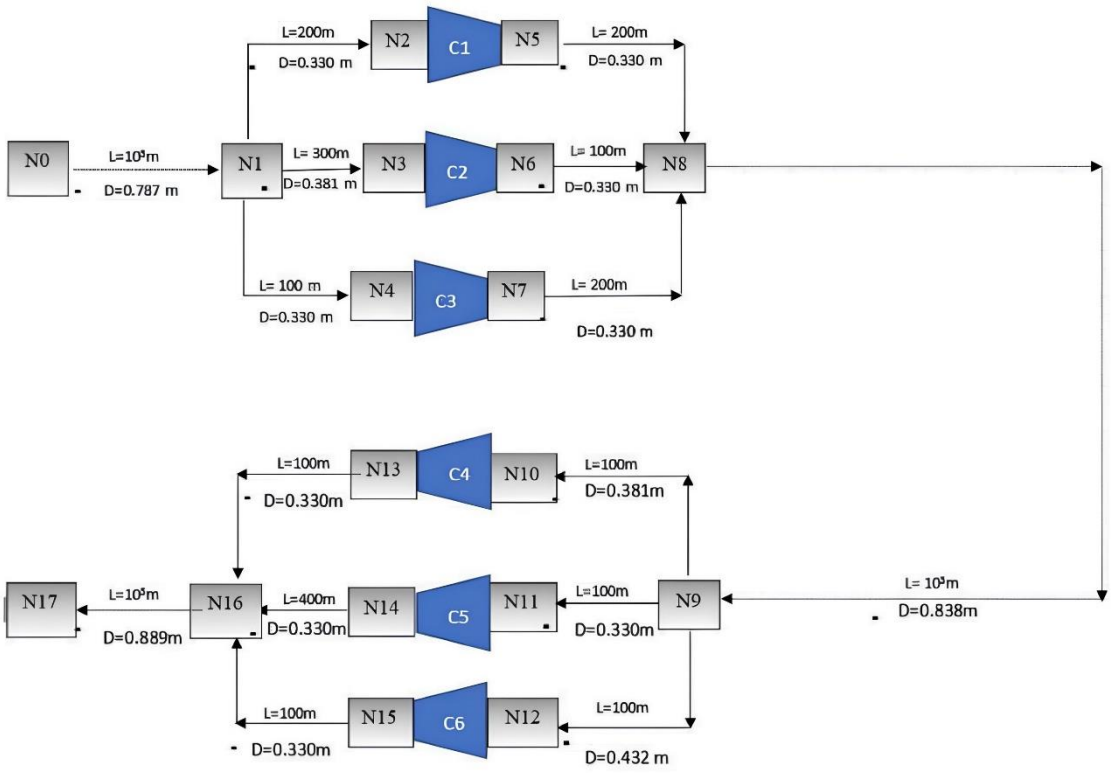


Figura 2.3 - Rede de pipelines de transporte de Gás Natural. Fonte: (Arya et al., 2023)

Numa primeira fase deste estudo foi avaliada a quantidade máxima permitida de hidrogénio injetado nas tubagens, com recurso ao *software* “CONOPT” da empresa GAMS, considerando três quantidades distintas de hidrogénio injetado, observando-se a variação das variáveis operacionais. A simulação demonstrou que, sob as condições e restrições operacionais dadas, a quantidade de hidrogénio que pode ser injetada na rede ilustrada na Figura 2.3 é de 9,85%. De seguida correu-se novamente a simulação utilizando quantidades de hidrogénio de 7,07% e 4,5%. As simulações mostraram que para as três quantidades de hidrogénio injetado, a pressão no nó de entrada (P0) e no nó de saída (P17), permanecem entre os limites inferior e superior, 58,8 bar e 61,2 bar respetivamente, garantindo que as tubagens permanecem seguras sob estas condições operacionais (Figura 2.4) (Arya et al., 2023).

Observando a Figura 2.4 é possível concluir também que a pressão à saída da segunda estação de compressão (P14) continua a ser a zona onde se regista o maior valor, independentemente da quantidade de hidrogénio presente na tubagem.

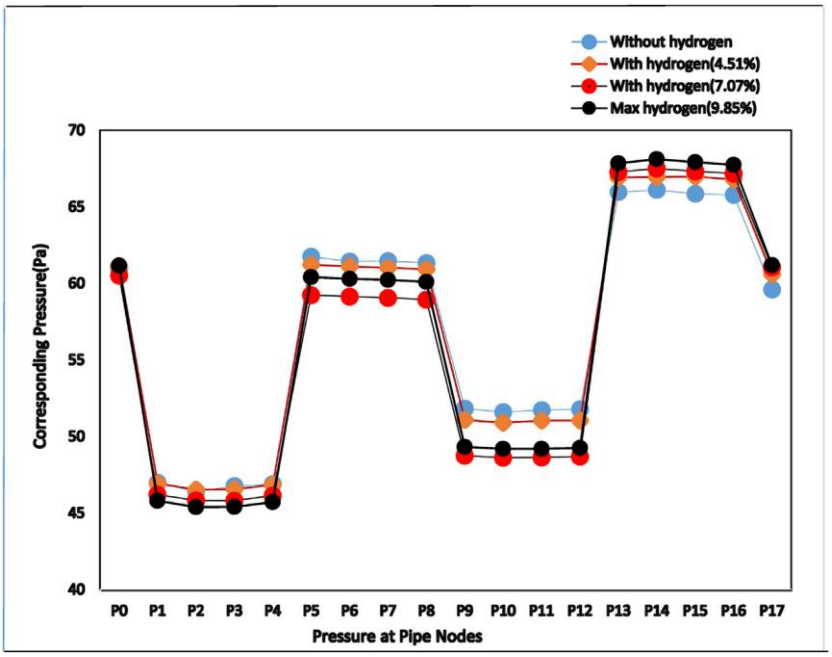


Figura 2.4 - Pressão nos vários nós da tubagem alterando a quantidade de Hidrogénio (mole %) presente no Gás Natural. Fonte: (Arya et al., 2023)

Analisando a Figura 2.5 conclui-se que a máxima quantidade de gás transportada ao longo da tubagem é alcançada quando não existe presença de hidrogénio na mistura gasosa. Como o hidrogénio tem um peso molecular inferior, o gás expande e é entregue em menor quantidade quando injetado na tubagem de gás natural.

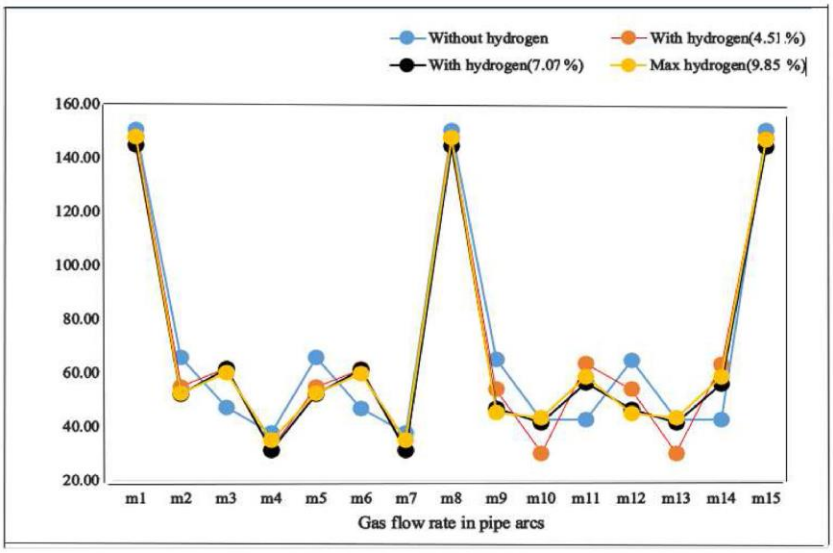


Figura 2.5 - Quantidade de gás transportada ao longo da tubagem alterando a quantidade de Hidrogénio (mole %) presente no Gás Natural. Fonte: (Arya et al., 2023)

Quanto ao rendimento dos compressores, o valor máximo é registado na presença da quantidade máxima de hidrogénio considerada (9,85%), dando, no entanto, origem a que o consumo de combustível registe o valor mais elevado (Figura 2.6 e 2.7).

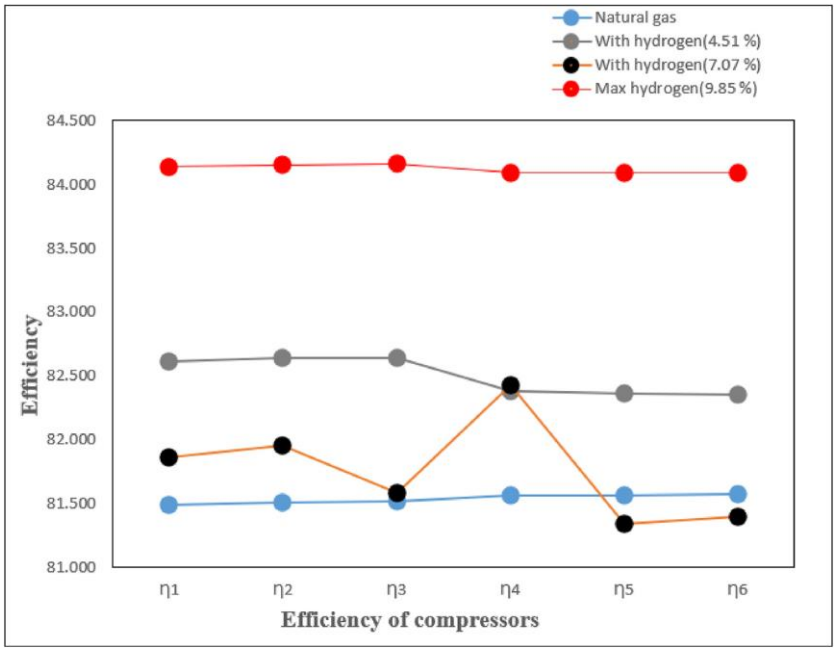


Figura 2.6 - Rendimento dos compressores. Fonte: (Arya et al., 2023)

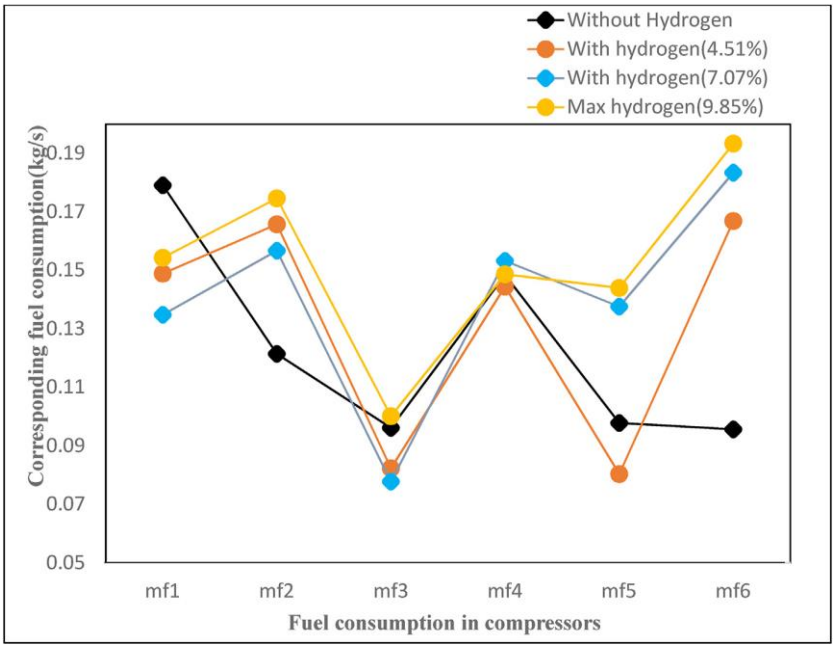


Figura 2.7 - Consumo de combustível dos compressores. Fonte: (Arya et al., 2023)

3 Risco

Segundo a norma ISO 31000 (ISO, 2018), Risco designa-se por efeito de incerteza na consecução dos objetivos. Efeito esse que se apresenta sob a forma de desvio, podendo ser positivo ou negativo, relativamente ao esperado. Existem objetivos de diversas naturezas como financeiros, de saúde, segurança, entre outros, e podem ser aplicados a diferentes níveis, estratégico, em toda a organização, de projeto, de produto e de processo.

Segundo o COSO (*Committee of Sponsoring Organizations*), a gestão do risco é "*Um processo desenvolvido pela administração, gestão e outras pessoas, aplicado na definição estratégica ao longo da organização, desenhado para identificar potenciais eventos que podem afetar a entidade, e gerir os riscos para níveis aceitáveis, fornecendo uma garantia razoável de que os objetivos da organização serão alcançados*" (Sobel et al., 2020).

A noção de risco costuma ser vulgarmente utilizada como sinónimo de perigo. No entanto, o risco prende-se com a vulnerabilidade, enquanto o perigo está associado à possibilidade de um prejuízo ou de um dano. É, portanto, possível distinguir o risco (a possibilidade de dano) e o perigo (a probabilidade de acidente ou patologia). De uma forma sucinta, o perigo é uma causa do risco (ISO, 2018).

3.1 Princípios

Para que se consiga vislumbrar uma abordagem estratégica da gestão do risco importa ter presente, de forma clara e concisa, os objetivos estratégicos e operacionais globais da organização. Por outro lado, a organização deverá, a todos os níveis, atuar em conformidade com os seguintes princípios:

- **A gestão de risco cria e protege o valor,** ou seja, contribui para que se alcancem os objetivos delineados e melhorias de desempenho.
- **A gestão do risco é parte integrante de todos os processos organizacionais,** faz parte das responsabilidades da gestão e não se opera de forma isolada das demais atividades de uma organização.

- **A gestão de risco é parte da tomada de decisão,** apoia os decisores na escolha informada.
- **A gestão de risco considera explicitamente a incerteza,** a natureza da mesma e a forma como pode ser tida em conta.
- **A gestão do risco é sistemática, estruturada e atempada,** o que conduz a resultados consistentes, comparáveis e fiáveis.
- **A gestão do risco baseia-se na melhor informação possível,** que está disponível sob a forma de dados históricos, retorno da informação de partes interessadas, observações, previsões e pareceres de especialistas.
- **A gestão do risco é feita à medida,** alinhada com os contextos externo, que pode incluir o ambiente cultural, social, político, legal, financeiro, tecnológico, relações com as partes interessadas externas, os fatores chave com impacto nos objetivos da organização; interno, que inclui a estrutura e cultura organizacional, as normas e linhas de orientação adotadas, os sistemas de informação, recursos e conhecimento; e com o perfil de risco da organização.
- **A gestão do risco tem em conta fatores humanos e culturais.** Reconhece os pontos fortes e fracos dos envolvidos que possam facilitar ou impedir a consecução dos objetivos da organização.
- **A gestão do risco é transparente e participada.** Envolve as partes interessadas na estratégia da organização.
- **A gestão do risco é dinâmica, iterativa e reativa à mudança.** Isto é, acompanha constantemente a mudança, adapta-se e mantém-se o mais atualizada possível.
- **A gestão do risco facilita a melhoria contínua da organização,** com base nos resultados da monitorização e das revisões que advêm da medição do desempenho organizacional.

3.2 Estrutura

De acordo com a norma ISO 31000 (ISO, 2018), o sucesso da gestão do risco dependerá da eficácia da estrutura de gestão em fornecer os fundamentos e as disposições que permitem a sua integração em todos os níveis da organização. A estrutura garante que a informação sobre o risco é corretamente reportada e serve de base à tomada de decisão e à responsabilização a todos os intervenientes.

A Figura 3.1 descreve as componentes necessárias da estrutura para gerir o risco e a forma como se correlacionam entre si.

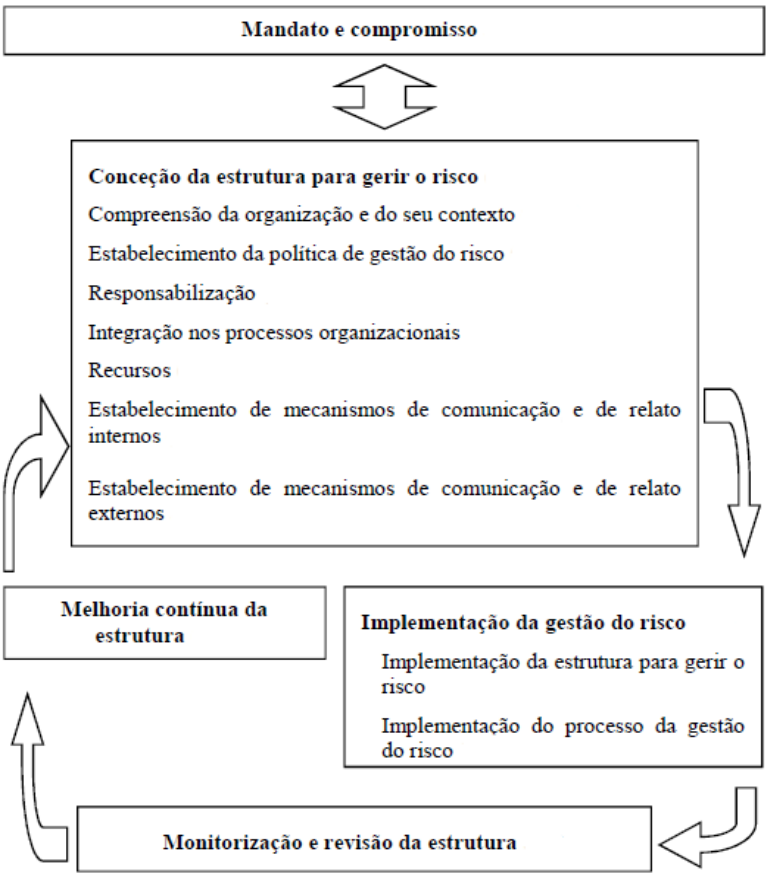


Figura 3.1 - Relações entre as componentes da estrutura para gerir o risco.
Fonte: Adaptado da norma ISO 31000:2018

A estrutura apresentada na Figura 3.1, visa apoiar a organização e integrar a gestão do risco na globalidade do seu sistema de gestão. É importante que cada componente seja adaptada por forma a satisfazer as necessidades específicas da organização, tirando o máximo proveito e eficácia.

A estrutura da gestão do risco da norma ISO 31000 (ISO, 2018) é composta pelos seguintes elementos:

Mandato e compromisso

Para que se consiga introduzir a gestão de risco e assegurar uma eficácia contínua, é necessário que a gestão de topo estabeleça um compromisso forte e sustentado com a gestão de risco, aliado a um planeamento estratégico rigoroso que fomente um compromisso com todos os níveis da organização.

A gestão de topo deverá começar por:

- Definir e aprovar a política de gestão do risco e, de seguida, assegurar que esta esteja alinhada com a cultura da organização.
- Determinar indicadores de desempenho da gestão de risco tendo em conta os existentes para avaliação do desempenho da organização.
- Estabelecer um alinhamento entre os objetivos da gestão de riscos com os objetivos e estratégias da organização.

- Assegurar a conformidade legal e regulamentar.
- Atribuir responsabilizações e responsabilidades aos níveis apropriados da organização.
- Alocar os recursos estritamente necessários à gestão do risco.
- Comunicar as vantagens da gestão do risco a todas as partes interessadas.
- Assegurar que a estrutura para gerir o risco de mantém apropriada.

Conceção da estrutura para gerir o risco

Este tópico inclui:

Compreensão da organização e do seu contexto: é importante que se compreenda o contexto quer interno quer externo da organização antes de iniciar o processo de conceção e implementação da estrutura uma vez que ambos os contextos influenciam significativamente a conceção da mesma.

Estabelecimento da política da gestão do risco: deve estabelecer de forma clara os objetivos e o compromisso da organização em matéria de gestão de risco e deve ser comunicada de forma apropriada.

Responsabilização: cabe à organização assegurar que existe responsabilização, autoridade e competência para gerir o risco. Para tal é essencial que se identifiquem os donos do risco, que têm a responsabilização e autoridade para gerir riscos; identificar o responsável por definir, implementar e elaborar a manutenção da estrutura de gestão de risco; identificar outras responsabilidades nos diversos níveis da organização no que em matéria de gestão do risco diz respeito; estabelecer medição do desempenho; assegurar níveis de reconhecimento adequados.

Integração nos processos organizacionais: para que a gestão do risco se torne eficaz, eficiente e se consiga tirar o máximo partido, esta deve ser integrada em todos os processos e práticas da organização.

Recursos: devem ser alocados os recursos necessários à gestão do risco e para tal devem ser tidas em conta as pessoas, aptidões, experiência e competências, formação, processos, métodos e ferramentas da organização.

Estabelecimento de mecanismos de comunicação e de relato internos: por forma a apoiar a responsabilização e a apropriação do risco, devem ser implementados mecanismos de comunicação e de relato interno que deverão incluir processos que permitam consolidar as informações relativas ao risco.

Estabelecimento de mecanismos de comunicação e de relato externos: quanto ao modo como a organização comunica com as partes interessadas, deverá ser criado um plano que promova a interação entre ambos, que garanta uma troca eficaz de informação de acordo com os requisitos legais, regulamentares e da governação e que permita criar confiança na organização.

Implementação da gestão do risco

Do ponto de vista da estrutura para gerir o risco, a organização deverá começar por definir um calendário apropriado, aliado a uma estratégia apropriada para implementação da mesma. Nos processos organizacionais devem ser aplicadas as políticas e processos da gestão do risco que obedeçam aos requisitos legais e regulamentares. De modo a assegurar que a estrutura de gestão do risco se mantém apropriada, deve haver comunicação e consulta com as partes interessadas, realizar formações com os membros da organização e assegurar que a tomada de decisão de encontre alinhada com os resultados dos processos da gestão do risco.

Para garantir a eficácia da estrutura é fulcral que se meça e reveja, de forma periódica, o desempenho, o progresso e os desvios face ao plano de gestão do risco com recurso a indicadores dos quais resultará um relatório sobre o risco. Este é um ponto consideravelmente importante uma vez que os contextos internos e externos da organização tendem a alterar-se com o tempo.

Com o objetivo de alcançar o estado de melhoria contínua da estrutura e com base nos resultados obtidos nos exercícios de monitorização e revisão, são tomadas decisões sobre o modo como a estrutura, a política e o plano de gestão do risco deverão ser melhorados.

3.3 Processo

Com a fase da estrutura definida surge a implementação do processo. Segundo a norma ISO 31000 (ISO, 2018), o processo deverá fazer parte da gestão e integrar-se na cultura e práticas organizacionais. Cada organização é diferente pelo que um processo que resulte numa empresa não quer dizer que resultará numa outra, assim os processos para a gestão do risco devem ser feitos à medida dos processos de negócio de cada organização. O conhecimento do negócio é fundamental para uma gestão do risco eficaz e de qualidade. Neste sentido, a colaboração entre os restantes serviços da organização e o serviço de auditoria interna é fundamental para uma boa gestão do risco.

A Figura 3.2 descreve as etapas necessárias para elaborar o processo de gestão de risco e a forma como se correlacionam entre si.

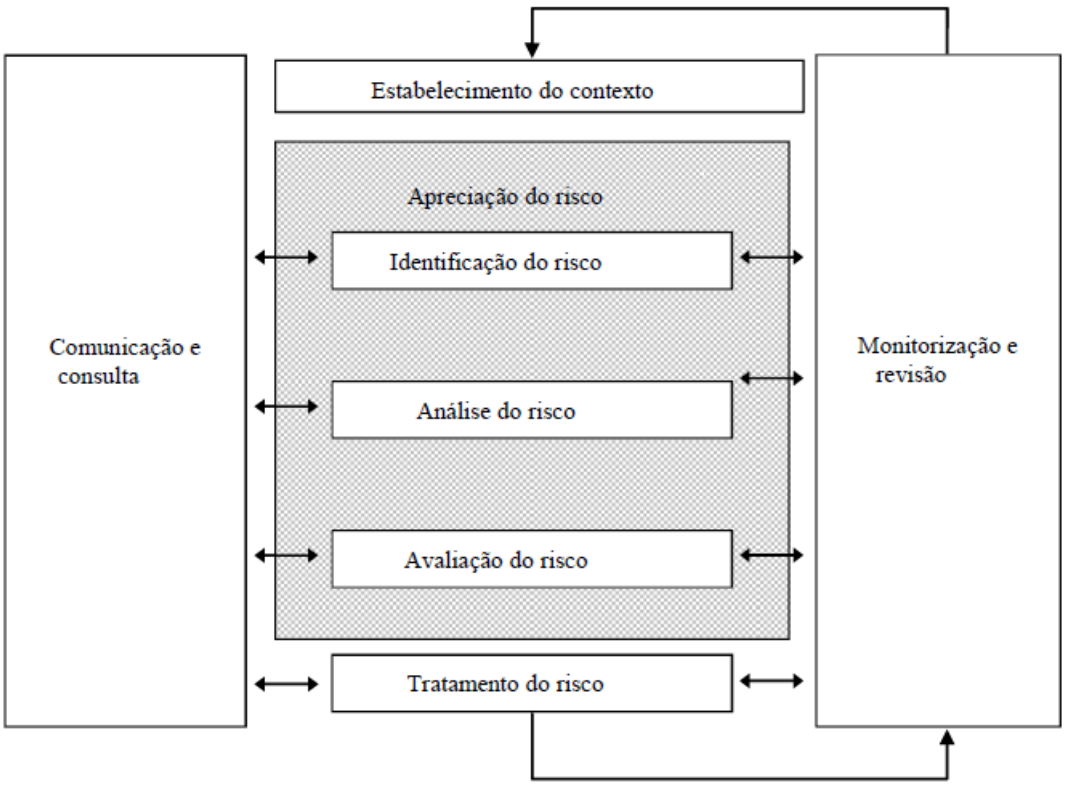


Figura 3.2 - Processo de gestão do risco. Fonte: Adaptado da norma ISO 31000:2018

Comunicação e consulta

Em todas as fazes do processo da gestão do risco é importante que haja comunicação com as partes interessadas. A comunicação e a consulta permitem desenvolver planos que, numa fase inicial, deverão abordar assuntos como o risco, as suas causas, consequências e medidas para que sejam mitigadas.

Uma abordagem eficaz permite obter inúmeras vantagens desde ajudar a garantir que os riscos são identificados de forma adequada, através do contributo de diferentes áreas de especialização com diferentes pontos de vista, uma vez que a perceção do risco varia de pessoa para pessoa, devido a diferença de valores, necessidades, pressupostos, conceitos e preocupações; ajudar a estabelecer o contexto de forma apropriada; garantir a adesão e o apoio a um plano de tratamento do risco; entre outros.

Em suma, no que à comunicação e consulta diz respeito, estas têm o papel de facilitar trocas de informação verdadeira, pertinente, precisa e compreensível, respeitando os aspetos de confidencialidade e de integridade pessoal.

Estabelecimento do contexto

Neste ponto a organização apresenta os seus objetivos, define os parâmetros internos e externos que permitam gerir o risco de forma eficaz, bem como o âmbito e os critérios de risco para as restantes partes do processo. Numa primeira instância é importante avaliar o contexto externo à organização, ou seja, tudo o que envolva exigências legais e requisitos regulamentares, situação social e cultural, as perceções das partes interessadas externas e outros aspetos específicos de riscos inerentes ao âmbito do processo da gestão de risco. Assim, a compreensão do contexto externo assegura que os objetivos e as expectativas das partes interessadas externas sejam tidos em conta no momento de elaborar os critérios do risco.

Por outro lado, a gestão do risco deverá ser desenvolvida com base no contexto interno da organização. O contexto interno da organização varia consoante as necessidades da mesma, mas, de uma forma geral, inclui a definição de objetivos, estratégias, o âmbito e os parâmetros das atividades da organização, responsabilidades, especificação de recursos requeridos, etc, com o objetivo de assegurar que a abordagem à gestão do risco adotada seja apropriada às circunstâncias, à organização e aos riscos que impedem que os objetivos se cumpram.

Identificação do Risco

Cabe à organização identificar as fontes do risco, as principais áreas de impacto, eventos, as suas causas e potenciais consequências, com o objetivo de criar uma lista abrangente dos riscos baseada nos eventos que possam de alguma for, seja ela negativa ou positiva, contribuir para a consecução dos objetivos. Devem ser identificados os riscos cuja fonte esteja ou não sob o controlo da organização e ter em consideração possíveis causas e cenários que mostrem as consequências que daí possam resultar.

Para que se consiga elaborar esta etapa com sucesso, a organização deverá estar dotada de técnicas e ferramentas de identificação do risco, adequadas aos seus objetivos e em linha com as suas capacidades, informação pertinente e atualizada e com a envolvência de pessoas com o conhecimento adequado.

Análise do Risco

De acordo com a norma ISO 31000 (ISO, 2018), a análise do risco implica desenvolver uma compreensão do risco. A análise do risco fornece uma entrada para a avaliação do risco e para as decisões quanto à necessidade dos riscos serem tratados, e sobre as estratégias e métodos mais apropriados para o tratamento do risco. A análise do risco pode também fornecer uma entrada para a tomada de decisões, onde as escolhas tenham de ser feitas e as opções envolvam diferentes tipos e níveis de risco.

Numa análise do risco são consideradas as causas e fontes do risco, as consequências que possam surgir e qual a probabilidade de as mesmas ocorrerem. O grau de confiança que existe na determinação do nível de risco bem como a sensibilidade que a pressupostos e condições prévias, devem ser tidos em conta na análise e comunicados às partes interessadas.

Avaliação do Risco

A avaliação do risco tem como principal objetivo apoiar uma tomada de decisão com base nos resultados da análise do risco. Envolve a comparação do nível de risco, identificado no processo de análise, aquando da consideração do contexto. As decisões tomadas deverão estar em conformidade com os contextos internos e externos à organização e, deverão ser influenciadas pela atitude da organização face ao risco e pelos critérios do risco que foram estabelecidos.

Esta fase é essencial para delinear uma resposta consistente. Em determinadas circunstâncias o risco pode ser:

- Transferido ou partilhado com outra organização.
- Aceite sem intervenção, no caso deste apresentar uma tolerância aceitável.
- Minimizado, não senso possível eliminá-lo por completo, podem-se tomar medidas concretas para reduzir a sua probabilidade e o seu impacto e devem ser eliminadas atividades que coloquem o risco em estado de descontrolo.

Tratamento do Risco

O tratamento do risco é feito com recurso à utilização de ferramentas que, quando implementadas, visam modificar os riscos e proporcionar ou modificar controlos. O tratamento do risco implica um processo cíclico onde inicialmente se aprecia o tratamento mais adequado do risco, de seguida decide-se se os níveis do risco residual são ou não toleráveis pelo que no caso de não serem deve ser escolhido um novo tratamento. Por fim é avaliada a eficácia do tratamento utilizado.

No entanto, as opções de tratamento do risco não são mutuamente exclusivas nem têm de ser apropriadas em todas as circunstâncias. De acordo com a norma ISO 31000 (ISO, 2018), as opções podem incluir o seguinte:

- Assumir ou aumentar o risco de forma a perseguir uma oportunidade.
- Evitar o risco mediante decisão de não iniciar ou continuar a atividade portadora do risco.
- Remover a fonte do risco.
- Alterar a verosimilhança.
- Alterar as consequências.

- Partilhar o risco com outra(s) parte(s) [incluindo contratos e financiamento do risco].
- Reter o risco com base em decisão informada.

Estas podem ser aplicadas de forma isolada ou combinadas, pelo que a segunda opção oferece à organização um conjunto mais alargado dos benefícios de cada opção. No momento da escolha devem-se comparar custos e os esforços da sua implementação com os benefícios resultantes, tendo em conta requisitos legais, regulamentares e outros tais como a responsabilidade social e a proteção do ambiente natural.

Para além da análise custo/benefício aquando da escolha das opções de tratamento do risco é também importante que sejam tidas em conta as perceções e os valores das partes interessadas. Em diversas circunstâncias as opções escolhidas podem ter impacto no risco de outras áreas da organização ou das partes interessadas, pelo que todos devem ser envolvidos na tomada de decisão.

Porém, as opções escolhidas para o tratamento do risco podem por si só introduzir novos riscos, pelo que a monitorização e a revisão deverão ser parte integrante do plano de tratamento do risco, de forma a garantir a eficácia das medidas adotadas. As responsabilidades de monitorização de revisão deverão estar claramente definidas e, os processos que lhes dizem respeito, deverão abranger todos os aspetos do processo de gestão de risco com o objetivo de:

- Assegurar que os controlos são eficazes e eficientes.
- Analisar e aprender com os eventos.
- Detetar alterações no contexto externo e interno.
- Identificar riscos emergentes.

O progresso na implementação dos planos de tratamento do risco fornece uma medida de desempenho. Os resultados que surgem da monitorização e revisão deverão ser registados e reportados externa ou internamente conforme apropriados, uma vez que permitem melhorar os métodos, ferramentas e processos na sua globalidade.

3.4 Técnicas de apreciação do risco

As técnicas de avaliação de risco, para além de serem parte integrante da gestão do risco, são ferramentas utilizadas para auxiliar na tomada de decisões onde há incerteza, com objetivo de fornecer informações sobre riscos específicos. Segundo a norma ISO 31010 (ISO, 2019), as técnicas podem ser utilizadas para:

- Esclarecer as implicações de pressupostos na consecução de objetivos.
- Comparar várias opções, sistemas, tecnologias ou abordagens, onde houver incerteza multifacetada em torno de cada opção.

- Auxiliar na definição de objetivos estratégicos e operacionais realistas.
- Ajudar a determinar os critérios de risco de uma organização.
- Ter em consideração os riscos ao definir ou revisar prioridades.
- Identificar ações efetivas e eficientes de tratamento de riscos.
- Aprender com os sucessos e insucessos para melhorar a forma como o risco é gerido.

A escolha da técnica bem como o método de aplicação devem ser ajustados ao contexto da organização e fornecer as informações necessárias às partes interessadas. É importante que se tenha em consideração o objetivo da avaliação, as necessidades das partes interessadas, requisitos legais, regulamentares e contratuais, o ambiente operacional, a importância da decisão, o tempo disponível, a complexidade da situação, entre outros.

As técnicas utilizadas para avaliar o risco podem ser de natureza quantitativa ou qualitativa. Ao decidir se uma técnica qualitativa ou quantitativa é mais apropriada, deve ser tido em conta o formato de resposta mais adequado às partes interessadas, a disponibilidade e a fiabilidade dos dados. As técnicas quantitativas requerem maior rigor na qualidade dos dados para fornecer resultados significativos, no entanto, quando os dados não são suficientes, a utilização deste tipo de técnica fornece uma melhor compreensão do risco ainda que o resultado obtido possa ser incerto (ISO, 2019).

A Figura 3.3 fornece uma visão geral das principais técnicas que podem ser utilizadas em cada etapa da gestão do risco.

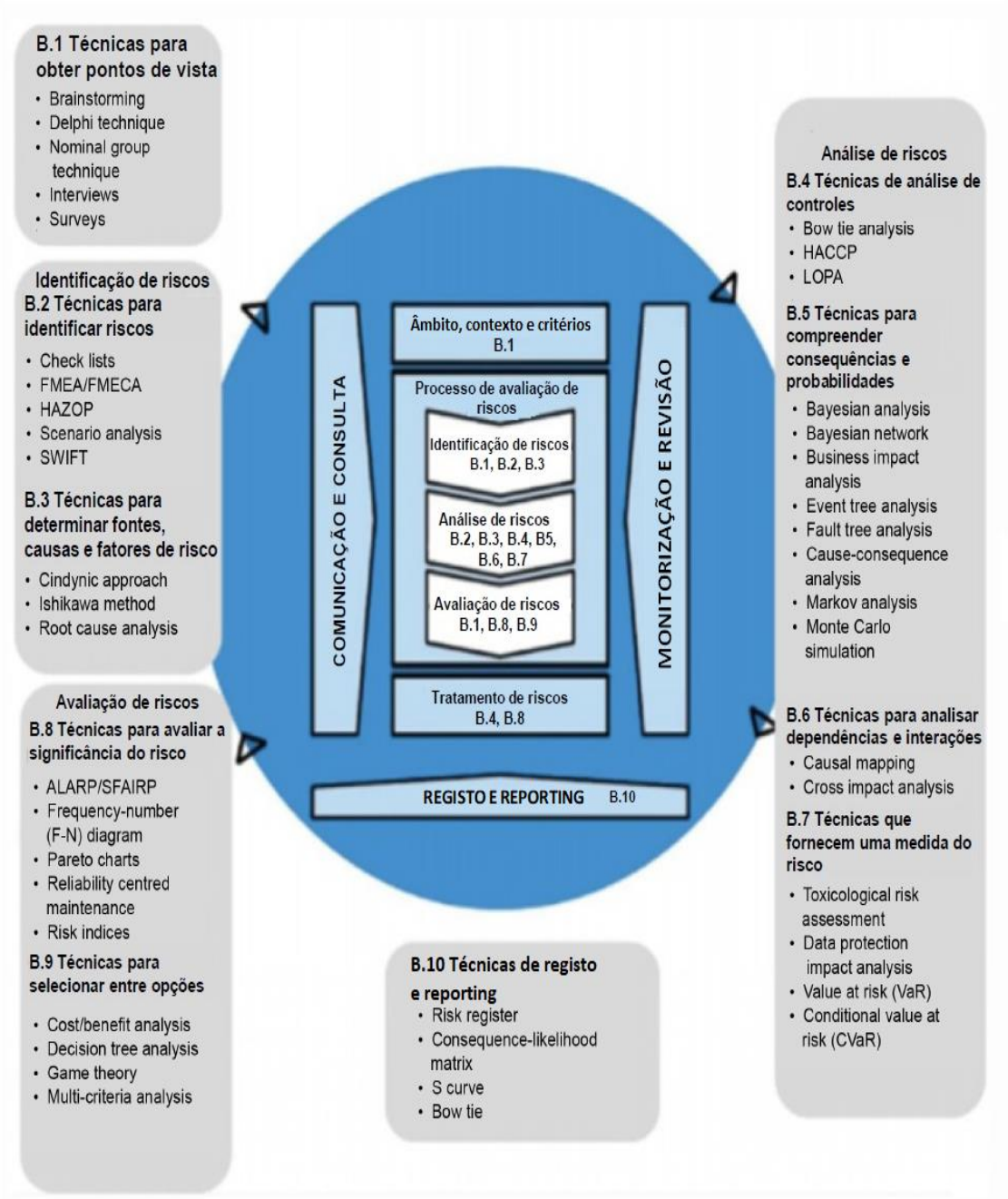


Figura 3.3 - Técnicas de avaliação de risco Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019

3.4.1 Técnicas para obter pontos de vista

No tópico B.1 da Figura 3.3, estão enumeradas algumas técnicas que podem ser utilizadas para extrair informações ou obter um consenso das partes interessadas e/ou especialistas. As suas opiniões podem ser obtidas individualmente, por meio de uma entrevista ou pesquisa, ou usando técnicas de grupo, através de um *brainstorming*, técnica de grupos nominais ou técnica de Delphi.

Em algumas situações, as partes interessadas têm experiência e funções específicas e há pouca divergência de opinião. No entanto, por vezes poderão existir fatores como uma variação significativa das opiniões das partes interessadas ou a

existência de estruturas de poder que afetam a forma como as pessoas interagem, que afetam a escolha do método utilizado.

Para que se alcancem bons resultados decorrentes deste tipo de técnicas, é essencial o papel de um coordenador/facilitador experiente e qualificado, capaz de organizar a equipa envolvida, obter e partilhar informações relevantes antes da reunião, preparar de forma estruturada e eficiente a reunião, provocar o espírito crítico e garantir que os resultados sejam precisos e isentos.

Brainstorming (B.1.2)

Um *brainstorming* consiste num processo utilizado para estimular e incentivar um grupo a desenvolver ideias relacionadas um ou mais temas de qualquer natureza. Para que se consiga tirar o máximo partido desta técnica é necessário que o facilitador estimule a criatividade de cada participante, sem limitar o pensamento, garantindo que estes não sejam influenciados pelas opiniões dos restantes membros do grupo.

Esta técnica pode apresentar um carácter mais ou menos formal, dependendo se é elaborado de forma mais ou menos estruturada. Pode ser aplicada em qualquer nível de uma organização para identificar incertezas, modos de sucesso ou falhas, causas de problemas, consequências, critérios para decisões ou opções de tratamento. Cada participante deverá possuir o conhecimento e experiência necessária para abordar o tema do *brainstorming* e objetivo principal do mesmo é elaborar uma lista de ideias sugeridas durante uma sessão de grupo bem como os pensamentos e ou preocupações que foram levantadas aquando da apresentação das ideias.

Por um lado, é uma técnica útil uma vez que envolve as principais partes interessadas incentivando a imaginação e criatividade, permitindo assim identificar problemas e soluções de forma rápida e fácil de elaborar, mas por outro lado, torna-se difícil conseguir o foco de todos os envolvidos e há pessoas que têm mais facilidade em criar ideias trabalhando individualmente do que em grupo.

Técnica de Delphi (B.1.3)

A técnica de Delphi é um procedimento que visa obter um consenso em relação às opiniões de um grupo de especialistas, através da recolha e comparação de respostas a questionários sequenciais, realizados individualmente e de forma anónima, sobre um tema específico, onde posteriormente cada participante vai tendo acesso às opiniões dos outros especialistas à medida que o processo avança.

As informações da primeira ronda de respostas são analisadas, combinadas e distribuídas aos membros do grupo, que podem então reconsiderar as suas respostas iniciais. O processo é repetido até que haja um consenso. Esta técnica conta com o

conhecimento e cooperação continuada de cada participante por meio de uma escala temporal, que pode variar entre dias, semanas, meses ou anos.

Uma vez que existe o anonimato na resposta, todas as opiniões têm o mesmo peso, evitando personalidades dominantes. Os participantes não precisam de estar reunidos no mesmo local ao mesmo tempo, podendo responder ao questionário à distância e com tempo para dar uma resposta ponderada a cada uma das questões. No entanto apresenta algumas limitações como o facto de ser um processo trabalhoso e demorado e é necessário que cada envolvido se consiga expressar de forma clara por escrito.

Técnica do grupo nominal (B.1.4)

À semelhança do *brainstorming*, a técnica do grupo nominal tem como principal objetivo recolher ideias de um grupo. Numa fase inicial o facilitador fornece a cada membro do grupo algumas questões e estes, de forma individual e sem interação com os restantes membros, partilham a sua opinião com base na sua experiência. De seguida discutem-se as ideias em grupo, cada membro vota numa ideia e é tomada uma decisão com base na votação final.

Esta técnica caracteriza-se por ser mais equilibrada do que o *brainstorming* uma vez que tende a produzir uma participação mais uniforme de todos os membros do grupo, independentemente do poder que tenham, sejam eles assíduos ou novos no grupo, seja o assunto controverso ou não, diminuindo assim a pressão que cada elemento poderia sentir, à semelhança de outras técnicas, em ter de se conformar com o grupo. Assim, é possível chegar a um consenso num espaço de tempo consideravelmente curto.

A principal desvantagem da técnica de grupo nominal é o facto de poder haver várias formas de expressar a mesma ideia entre os membros do grupo, o que por vezes, dificulta o processo de agrupar as ideias finais.

Entrevista (B.1.5)

Uma entrevista é uma ferramenta utilizada como forma de obter informações e opiniões detalhadas dos membros de um grupo. Podem ser do tipo estruturada, quando os entrevistados, individuais, respondem a um conjunto de perguntas preparadas, ou do tipo semiestruturada, se para além das perguntas que são colocadas pelo entrevistador existe também liberdade para debater outras questões que surjam durante a sessão.

Uma entrevista estruturada permite que o entrevistado se prepare e tenha tempo para refletir sobre o assunto. Por outro lado, requerem alguma experiência na sua elaboração e o entrevistador deve ser imparcial às respostas do entrevistado.

Inquérito (B.1.6)

Um inquérito pressupõe um número mais considerável de pessoas do que uma entrevista e apresenta pergunta mais restritas. Normalmente é feito sob a forma de questionário em papel ou com recurso aos meios digitais, e oferece respostas do tipo sim ou não, escolhas de uma escala de classificação ou de uma variedade de opções, permitindo assim uma análise estatística dos resultados, muitas vezes em forma gráfica. Por vezes existem também questões com resposta livre, no entanto não é muito comum uma vez que dificulta a sua análise.

Este tipo de ferramenta destaca-se não só por ter um custo relativamente baixo, especialmente se for utilizado um *software online*, mas também por apresentar resultados de fácil compreensão permitindo elaborar gráficos e relatórios que podem ser partilhados posteriormente.

No entanto, apesar de apresentar perguntas de natureza limitada, pela necessidade de serem simples e inequívocas, por vezes os entrevistados podem interpretar as perguntas de forma diferente à que seria esperada pela pessoa que elaborou o inquérito. É uma ferramenta de baixa taxa de resposta boa e imparcial, pelo que se torna necessário ter conhecimento no seu desenvolvimento para que se alcancem resultados úteis para a análise estatística dos resultados. Em alguns casos é necessário obter algumas informações demográficas para interpretar os resultados.

3.4.2 Técnicas para identificar riscos (B2)

Geral (B.2.1)

No tópico B.2 da Figura 3.3, estão enumeradas algumas técnicas que podem ser utilizadas como abordagens estruturadas para identificar riscos. As técnicas para identificação de riscos podem incluir métodos baseados em evidências, como revisões de literatura e análise de dados históricos, métodos empíricos, pesquisas de perceção, listas de verificação baseadas em dados anteriores ou modelos teóricos, entre outros.

Listas de verificação, classificações e taxonomias (*check-lists*) (B.2.2)

As listas de verificação podem ser utilizadas durante a avaliação de riscos para auxiliar a compreensão do contexto, na identificação de riscos e no agrupamento dos mesmos para diversos fins durante a análise. Normalmente esta técnica é também utilizada na gestão do risco para classificar controlos e tratamentos, para definir responsabilidades e comunicar riscos.

A elaboração de uma lista de verificação pode ser baseada em experiências anteriores, quer tenham sido bem ou malsucedidas, no entanto, tipologias e taxonomias de riscos mais formais podem ser desenvolvidas para categorizar ou classificar os riscos com base em atributos comuns. No que diz respeito às tipologias, constituem-se sob a

forma de esquemas de classificação conceitualmente derivados de “cima para baixo”, enquanto as taxonomias derivam de “baixo para cima”. Existem também formas híbridas que combinam tipologias com taxonomias.

Listas de verificação, classificações e taxonomias podem ser elaboradas com foco na aplicabilidade ao nível estratégico ou operacional. As suas formas mais comuns de apresentação são sob a forma de questionários, entrevistas, *workshops* ou a combinação dos três, realizados em ambientes presenciais ou em plataformas digitais.

Por um lado, a utilização destas ferramentas promove um entendimento comum do risco entre as partes interessadas e requerem pouca experiência especializada, mas, por outro lado, a sua utilização pressupõe a existência de experiências anteriores, a falta de informação pode levar a sobreposições e/ou lacunas, pelo que a sua utilização se torna limitada na abordagem de uma situação nova.

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) e Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMECA) (B.2.3)

Uma das ferramentas mais utilizadas para identificar potenciais riscos é a FMEA. Trata-se de uma metodologia que permite identificar ações prioritárias de melhoria em processos ou produtos. A FMEA pode ser seguida de uma análise de criticidade que define a significância de cada modo de falha (FMECA) (ISO, 2019). A elaboração de uma FMEA/FMECA recorre à utilização de indicadores numéricos que classificam os seguintes fatores:

- Severidade: indica o comprometimento do sistema com o acontecimento do risco detetado;
- Ocorrência: indica a frequência com que o risco tende a ocorrer;
- Detetabilidade: indica o grau de deteção do risco quando o mesmo ocorra.

Tabela 3.1 - Exemplo de uma FMEA

Sistema	Componente	Modo de falha	Causas	Efeitos	Severidade	Ocorrência	Detetabilidade	RPN	Grau de Risco
Estação de armazenamento de LH2	Tanque de armazenamento	Rotura do tanque.	Acidente ou colisão.	Perda de produto inflamável.	2	4	2	16	Baixo

O produto entre a Severidade x Ocorrência x Detetabilidade resulta num indicador denominado por *Risk Priority Number* (RPN). Através do RPN é possível identificar as ações prioritárias de melhoria, ou seja, quanto mais elevado for este indicador maior é a necessidade de atuar para otimizar o processo e reduzir a ocorrência do risco.

A equipa responsável pela análise deverá basear-se em:

- Histórico de avarias.
- Experiência dos participantes.
- Critérios de decisão estabelecidos.

- Conhecimento do processo em causa e as suas particularidades.

Uma FMEA deve realizar-se segundo as seguintes etapas:

1. **Selecionar a equipa:** Nesta etapa é importante escolher elementos com competências distintas uns dos outros e que tenham conhecimento do processo e ou da organização.
2. **Determinar as falhas possíveis:** De acordo com as técnicas sugeridas na Figura 5, um *Brainstorming* será essencial nesta etapa, onde se discuta e se listem todas as possíveis falhas para mais tarde serem classificadas.
3. **Identificar como ocorrem as falhas:** É importante identificar a forma como cada falha ocorre e qual a sua origem.
4. **Identificar as consequências:** Podem ser internas ou externas.
5. **Classificar a Severidade (S):** Nesta fase classifica-se a severidade de cada falha, origem e consequência, numa escala numerada de 1 a 10, onde 1 representa uma gravidade insignificante e o 10 uma perda total.
6. **Identificar as Causas.**
7. **Identificar a Probabilidade de Ocorrência (O):** Utilizando uma escala de 1 a 10, onde 1 representa a improbabilidade de ocorrência e 10 a regularidade.
8. **Determinar e classificar o fator de Detetabilidade (D):** Utilizando uma escala de 1 a 10, onde 1 representa controlo total e 10 significa que não é possível controlar.
9. **Determinar o RPN:** RPN = S x O x D
10. **Definir estratégias:** Depois de determinar o RPN é necessário atuar sobre as falhas com maior resultado.
11. **Monitorizar:** É essencial a monitorizar todas as ações anteriormente descritas para melhoria do desempenho da organização.

Em suma, as análises FMEA/FMECA podem ser amplamente aplicadas a comportamentos humanos, sistemas e procedimentos técnicos; identificam os modos de falha, as suas causas e efeitos e apresentam-nos de uma forma fácil de compreensão; evitam a necessidade de modificações dispendiosas de equipamentos em serviço e destacam os principais recursos a serem monitorizados. No entanto têm algumas limitações como o facto de poderem ser apenas utilizadas para identificar modos de falha únicos e, a menos que haja controlo adequado, os estudos podem ser caros.

Hazard and Operability Study (HAZOP) (B.2.4)

O termo HAZOP, que em português significa Estudo de Perigo e Operabilidade, consiste num exame estruturado e sistemático de um processo, procedimento ou

sistema complexo que envolve a identificação de possíveis desvios da intenção do projeto e o exame das possíveis causas e consequências.

A metodologia utilizada nesta técnica é baseada num procedimento qualitativo, que gera perguntas de maneira estruturada e sistemática através do uso apropriado de um conjunto de palavras-guia. Numa primeira fase subdivide-se o sistema, processo ou procedimento em elemento menores, seguida da fase onde se acorda a intenção de projeto para cada elemento e se definem os parâmetros relevantes. Posteriormente aplicam-se as palavras-guia a cada parâmetro e para cada elemento de modo a postular possíveis desvios da intenção de projeto, que possam originar resultados indesejados. Segue-se etapa onde se acordam as causas e consequências em cada cado, sugerindo formas de tratamento dos riscos identificados, terminando com a documentação de toda a discussão, quais as palavras-guia utilizadas e as possíveis causas de desvios.

As palavras-guia são aplicadas a parâmetros como:

- Propriedades físicas de um material ou processo.
- Condições físicas como temperatura ou velocidade.
- Tempo.
- Uma intenção específica de um sistema ou projeto (Ex: transferência de informações).
- Aspetos operacionais.

Tabela 3.2 - Exemplos de palavras-guia e os seus significados Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019.

Palavra-chave	Definição
Não / Nenhum	Nenhuma parte do resultado pretendido é alcançada ou a condição pretendida está ausente
Mais (maior)	Aumento quantitativo
Menos (menor)	Diminuição quantitativa
Tanto quanto	Modificação/aumento qualitativo (Ex: material adicional)
Parte de	Modificação/diminuição qualitativa (Ex: apenas um de dois componentes de uma mistura)
Reverso / Oposto	Lógica contrária à intenção de projeto (Ex: refluxo)
Em vez de	Substituição completa (Ex: material errado)
Cedo	Relativo ao horário do relógio
Tarde	Relativo ao horário do relógio

A técnica HAZOP é normalmente utilizada para melhorar um projeto ou identificar os riscos associados a uma mudança do mesmo. No entanto, também durante a fase de operação esta pode ser utilizada, com a desvantagem de que implicará custos mais elevados. A sua realização implica a posse de informações atuais sobre o sistema alvo de estudo, especificações da intenção do projeto (desenhos, diagramas, controlos de processo, procedimentos de operação e manutenção, etc.), bem como uma equipa

multidisciplinar de projetistas, operadores do sistema e um líder com experiência na elaboração de estudos HAZOP.

As principais limitações desta técnica prendem-se com o facto de análises mais detalhadas que, para além de requerem um alto nível de documentação, tornam-se mais demoradas e dispendiosas; tende a ser repetitiva, encontrando os mesmos problemas várias vezes; é limitada pelo projeto, pela intenção do projeto, o seu âmbito e os objetivos da equipa.

Análise de cenários (B.2.5)

A análise de cenários é o nome dado a um conjunto de técnicas que envolvem o desenvolvimento de modelos de previsão de cenários plausíveis, e trabalhar com o que poderá acontecer dados vários desenvolvimentos futuros possíveis.

Esta técnica é frequentemente utilizada para identificar riscos e explorar as suas consequências, podendo ser aplicada quer ao nível estratégico quer operacional de uma organização, como um todo ou parte dele. Para escalas de tempo consideravelmente curtas, pode envolver a extrapolação de acontecimentos passados para contruir os cenários prováveis, como acontece por exemplo no planeamento de emergências ou interrupções de negócio. Por outro lado, escalas temporais mais alargadas são utilizadas para o planeamento de mudanças significativamente maiores no futuro, como é o caso de mudanças de preferência dos consumidores, atitudes sociais, alterações tecnológicas, etc.

Ainda que esta técnica não permita prever a probabilidade de ocorrência deste tipo de mudança, permite não só que uma organização desenvolva pontos fortes e resiliência necessária para se adaptar às mudanças possíveis, mas também que esta se antecipe a possíveis ameaças e oportunidades, podendo ser utilizada em todos os tipos de risco. Por outro lado, apresenta limitações como o facto dos cenários utilizados poderem não ter uma base adequada e por isso, os dados utilizados podem ser especulativos conduzindo a resultados irrealistas, e não há evidências suficientes que comprovem que os cenários explorados para um futuro a longo prazo são aqueles que realmente ocorrem.

Structured what-if technique (SWIFT) (B.2.6)

A técnica SWIFT, que em português significa técnica hipotética estruturada, é uma técnica de identificação de risco de alto nível que pode ser utilizada de forma independente ou como parte de uma abordagem em etapas para tornar os métodos de baixo para cima, como HAZOP ou FMEA, mais eficientes. Esta técnica recorre à elaboração de um *brainstorming* estruturado (B.1.2) num ambiente de *workshop* onde se combina um conjunto de palavras-guia predeterminado (tempo, quantidade, etc.)

com perguntas fornecidas pelos participantes do tipo “e se…?” ou “como poderia…?”. É semelhante à técnica HAZOP mas aplicada a um sistema ou subsistema, e não à intenção do projetista.

Numa fase inicial o facilitador prepara uma lista com os principais riscos ou fontes de riscos a serem analisados, e posteriormente, dá-se início ao *workshop* onde se começa por discutir o contexto, o âmbito e o objetivo da utilização desta técnica. Utilizando as palavras-guia e as perguntas do tipo “e se…?”, o facilitador pede aos participantes que levantem e discutam questões sobre:

- Riscos conhecidos;
- Fontes de risco;
- Experiências anteriores, sucessos e incidentes;
- Controlos conhecidos e existentes;
- Requisitos e restrições regulamentares.

Do *workshop* resulta uma lista de riscos, onde podem ser aplicados métodos de avaliação de risco qualitativo ou semiquantitativo para classificar as ações criadas em termos de nível de risco.

Esta é uma técnica amplamente aplicável aos mais variados sistemas, situações ou circunstâncias, organização ou atividade, que pode ser utilizado para identificar oportunidades de melhoria e que rapidamente os principais riscos e fontes de risco se vão tornando evidentes ao longo da sessão do *workshop*, mas requer o mínimo de preparação e experiência ampla o suficiente por parte dos participantes e por vezes as recomendações que resulta da sessão poderão tornar-se demasiado genéricas.

3.4.3 Técnicas para determinar fontes, causas e fatores de risco (B3)

Geral (B.3.1)

A compreensão das causas de um evento e dos seus condutores de risco pode ser utilizada para projetar estratégias para mitigar as consequências adversas. No tópico B.3 da Figura 3.3 estão enumeradas algumas técnicas que podem ser utilizadas proativamente para analisar as principais fontes, causas e condutores do risco, de eventos que já ocorreram ou de eventos que poderão ocorrer no futuro.

Abordagem de Cindynic (B.3.2)

A Abordagem de *Cindynic*, comummente conhecida por ciência do perigo, é uma ferramenta que identifica fontes de riscos intangíveis e condutores de risco que podem dar origem às mais variadas consequências. Em particular identifica e analisa inconsistências, ambiguidades, omissões, ignorância e divergências entre as partes interessadas.

Numa fase inicial é recolhida informação sobre o sistema ou organização objeto de estudo e situação *Cindynic* em que se encontra, definida por um espaço geográfico, temporal e cronológico por um grupo de partes interessadas, e de seguida utilizam-se ferramentas como entrevistas semiestruturadas (B1.5) para recolher informações em vários momentos, sobre o grau de conhecimento e o estado de espírito de cada parte interessada, conforme se relacionam com os seguintes critérios de abordagem de *Cindynic*:

- Objetivo.
- Valores.
- Regras.
- Dados.
- Modelos.

Obtida a informação de cada um dos elementos envolvidos, analisa-se a coerência entre os objetivos a serem alcançados e os restantes critérios desta metodologia, e estrutura-se a informação recolhida em tabelas onde são listadas as deficiências e divergências identificadas. Esta é uma ferramenta que possui uma abordagem multidimensional e multidisciplinar, que fornece conhecimento de um potencial risco de um sistema e a sua consistência, tendo em consideração aspetos humanos e organizacionais, noções de espaço e tempo, capaz de produzir soluções para mitigar os riscos. No entanto apresenta limitações como o facto de não ser capaz de priorizar fontes de risco ou riscos e, quando existe um número significativo de partes interessadas envolvidas, pode exigir algum tempo e recursos.

Método de Ishikawa (B.3.3)

O método de Ishikawa, também conhecido como método da espinha de peixe, utiliza uma abordagem para identificar possíveis causas de um evento, o seu efeito, problemas ou situações indesejáveis. A informação é apresentada sob a forma de um diagrama de espinha de peixe (Figura 3.4):

Inicialmente define-se o efeito a ser estudado, que pode ser positivo no caso de se tratar de um objetivo ou negativo caso seja um problema, e situa-se o mesmo na zona da cabeça do peixe. Posteriormente definem-se as categorias das causas, onde visualmente se apresentam como espinhas ligadas à espinha central do peixe. Na Figura 3.4 foi utilizado o método dos 6M's para a seleção das categorias, em que todas elas são palavras iniciadas pela letra "M". De seguida são enumeradas as causas dentro de cada categoria.

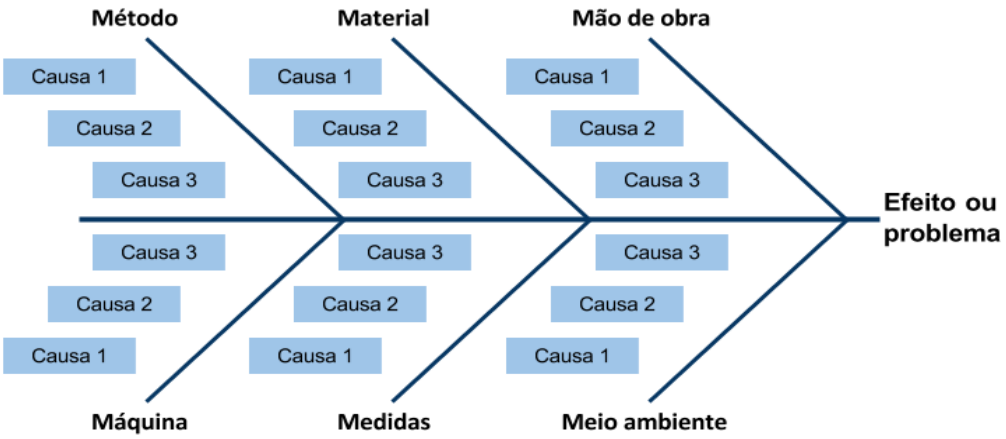


Figura 3.4 - Exemplo de um diagrama Ishikawa (espinha de peixe)

Esta ferramenta é utilizada na realização de uma análise da causa raiz de um evento que ocorreu ou para identificar fatores que podem contribuir para resultados que poderão vir a ocorrer no futuro. Pode ser utilizada a qualquer nível organizacional e em qualquer espaço temporal.

3.4.4 Técnicas para análise de controlos

Geral (B.4.1)

No tópico B.4 da Figura 3.3 estão enumeradas algumas técnicas que podem ser utilizadas para verificar se os controlos utilizados são apropriados e adequados.

Análise *Bow Tie* (B.4.2)

A análise *Bow Tie* consiste numa representação gráfica, com um aspeto em forma de laço, dos caminhos desde as causas de um evento até às suas consequências. É um método de avaliação do risco que pode ser utilizado para analisar e demonstrar relações causais em cenários de risco elevado. Numa primeira fase fornece um resumo visual de todos os cenários de riscos plausíveis que possam existir em torno de um determinado perigo, e posteriormente exibe as medidas que podem ser tomadas para controlar esses cenários. Por vezes pode ser considerada uma representação simplificada de uma árvore de falhas (FTA) ou de uma árvore de eventos (ETA), e tem o aspeto gráfico apresentado na Figura 3.5.

Esta ferramenta é utilizada para exibir e comunicar informações sobre riscos em situações em que um evento tenha uma variedade de possíveis causas e consequências. Por outro lado, tem também a capacidade de avaliar os controlos utilizados, para verificar se cada caminho da causa para o evento e do evento para a consequência possui controlos eficazes e se os fatores que podem causar falhas nesses controlos são reconhecidos.

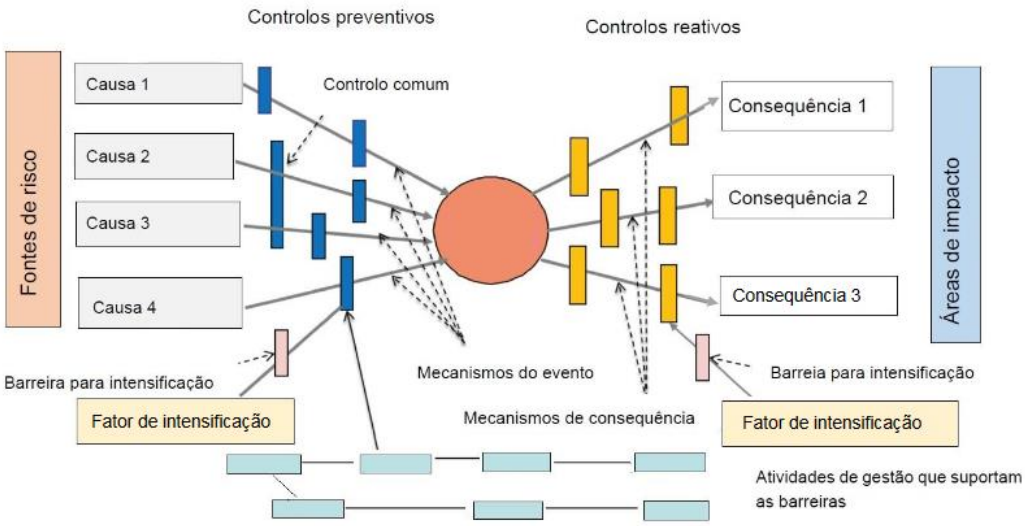


Figura 3.5 - Exemplo de um diagrama de Bow-Tie. Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019

O diagrama de *Bow-Tie* apresenta como principais vantagens a sua fácil interpretação gráfica, onde se sobressaem os eventos, as suas causas e consequências, podendo ser utilizada quer para consequências desejáveis ou indesejáveis, e não carece de um elevado nível de experiência por quem a utiliza. Contudo não pode ser utilizada para representar situações em que os caminhos das causas para o evento não são independentes, isto é, como acontece em casos na análise de árvore de falhas, onde existam portas lógicas do tipo AND, e por vezes pode simplificar demasiado situações complexas.

Hazard Analysis and Critical Control Point (HACCP) (B.4.3)

Análise de Perigos e Controlo de Pontos Críticos ou *Hazard Analysis and Critical Control Point* (HACCP), é uma técnica que fornece uma estrutura para identificar fontes de risco, perigos ou ameaças, e permite definir controlos em partes relevantes de um processo com o objetivo de minimizar os riscos e garantir a qualidade à saída do mesmo.

De acordo com a norma ISO 31010 (ISO, 2019), esta técnica rege-se segundo sete princípios:

1º. Identificar os perigos, fatores que influenciam o risco e possíveis medidas preventivas.
2º. Determinar os pontos no processo onde é possível monitorizar e definir controlos para minimizar as ameaças (PCC – Pontos Críticos de Controlo).
3º. Definir limites críticos para os parâmetros monitorizados.
4º. Estabelecer procedimentos para monitorizar os limites de cada PCC em cada intervalo.

5º. Definir ações corretivas quando o processo sair fora dos limites estabelecidos.
6º. Definir procedimentos de verificação.
7º. Implementar procedimentos de registos de manutenção e documentação para cada etapa.

Como principais vantagens esta técnica fornece evidências documentadas para o controlo de qualidade ao longo do processo, em vez de depender da inspeção do produto final, bem como permite identificar e reduzir riscos, mas, por outro lado, é necessário que os perigos sejam inicialmente identificados e a importância que os riscos associados têm deve ser compreendida no início do processo.

Layers of Protection Analysis (LOPA) (B.4.4)

Análise de Camadas de Proteção ou *Layers of Protection Analysis* (LOPA), é uma técnica que analisa a redução do risco que é alcançada pelo conjunto de controlos existentes num processo.

Inicialmente seleciona-se um par causa-consequência de uma lista de riscos identificados e identificam-se as camadas de proteção independentes. Camadas essas que podem ser sistemas, dispositivos ou ações capazes de impedir que um cenário prossiga para a sua consequência indesejada. Exemplos:

- Características de *design*;
- Dispositivos de proteção física;
- Intertravamentos e sistemas *shutdown*;
- Alarmes e intervenção manual;
- Proteções físicas após o evento;
- Sistemas de resposta de emergência.

A LOPA pode ser utilizada de forma qualitativa para avaliar as camadas de proteção entre a causa e a sua consequência ou para alocar recursos para o tratamento de riscos, normalmente de caráter operacional, analisando a redução do risco produzida por cada camada de proteção. Pode ser aplicada a sistemas com horizonte temporal curto ou longo.

Por um lado, requer menos tempo e recursos do que técnicas como a Análise de Árvore de Eventos, ajuda a identificar e concentrar recursos nas camadas mais críticas de proteção e identifica as operações, sistemas e processos com proteções insuficientes. No entanto o facto de se concentrar apenas num par causa-consequência de cada vez leva a que não seja possível cobrir iterações mais complexas com muitos pares causa-consequência ou onde existe uma grande variedade de consequências que afetem diferentes partes interessadas.

3.4.5 Técnicas para compreender consequências e probabilidade

Geral (B.5.1)

As ferramentas abordadas neste capítulo visam fornecer uma melhor compreensão das consequências, com recurso à elaboração de experiências e estudos, pesquisa de eventos passados ou até mesmo técnicas como a Análise de Cenários (B.2.5), que estimulam o pensamento imaginativo; e da probabilidade de ocorrência de um evento, que pode ser estimada com extrapolação de dados históricos, síntese de dados relativos a falhas com recurso a técnicas como Análise de Árvore de Eventos (B.5.6), Análise de Árvore de Falhas (B.5.7), Análise de Causa e Consequência (B.5.5) ou técnicas de simulação.

Análise Bayesiana (B.5.2)

A Análise Bayesiana consiste na avaliação de hipóteses pela máxima verosimilhança a partir de dados. Segundo a norma ISO 31010 (ISO, 2019), os métodos Bayesianos podem ser utilizados para fornecer uma estimativa prévia de um parâmetro de interesse com base em crenças subjetivas. Estimativa essa que pode fornecer uma previsão da probabilidade de um evento ocorrer o que pode ser útil na avaliação de riscos para a qual não existam dados empíricos.

Os modelos de probabilidade que sustentam esta análise dependem da sua aplicação. No caso de uma análise feita a eventos de acidentes, não conformidades ou entregas atrasadas por norma é utilizado o modelo probabilístico de Poisson.

A Análise Bayesiana é baseada no Teorema de Bayes:

$$\Pr(A|B) = \frac{\Pr(\mathrm{B}|\mathrm{A}).\Pr(\mathrm{A}).}{\Pr(\mathrm{B})} \tag{3.2}$$

Onde:

- Pr(A) – Probabilidade de A ocorrer.
- Pr(B) – Probabilidade de B ocorrer.
- Pr(A|B) – Probabilidade de A ocorrer dado que B ocorreu.
- Pr(B|A) – Probabilidade de B ocorrer dado que A ocorreu.

Assim, esta análise é capaz de fornecer mecanismos para utilizar crenças subjetivas sobre um problema ou combinar crenças anteriores com novos dados, no entanto pode produzir resultados dependentes de escolhas anteriores e a resolução de problemas mais complexos implica um maior dispêndio de tempo e envolve custos computacionais elevados.

Redes Bayesianas e Diagramas de Influência (B.5.3)

As redes Bayesianas, ou *Bayesian Networks*, são modelos gráficos que representam de forma simplificada relações de casualidade das variáveis de um sistema. Possuem nós que representam variáveis aleatórias (discretas e/ou contínuas) e são conectados por arcos direcionados que representam dependências diretas entre variáveis. A relação da dependência entre variáveis, é quantificada com recurso a distribuições de probabilidade condicionada, associadas a cada nó, onde o estado dos nós filhos depende da combinação dos valores dos nós pais na rede (Figura 3.6).

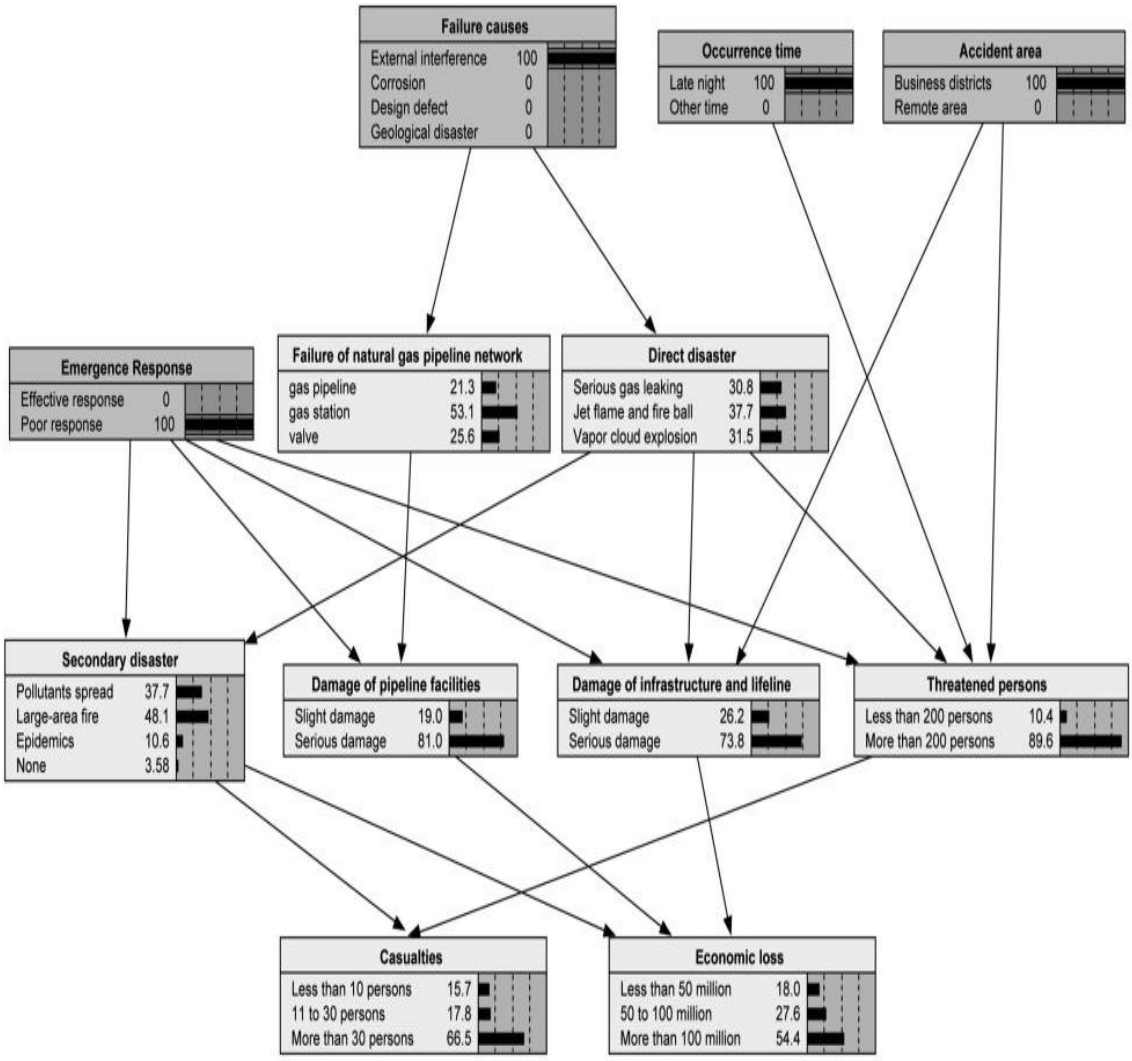


Figura 3.6 - Exemplo de Rede Bayesiana aplicada a uma análise probabilística de acidentes em pipelines de gás natural. Fonte: (Wu et al., 2017)

Uma rede Bayesiana contém variáveis que representam eventos incertos e podem ser usadas para estimar a probabilidade ou risco ou para inferir os principais fatores de risco que levam a consequências específicas. Uma rede destas pode ser estendida para incluir tomadas de decisão e avaliações dando origem aos Diagramas de Influência, que podem ser utilizados para avaliar o impacto de controlos/mitigações de risco ou para avaliar opções de intervenção.

As redes Bayesianas fornecem modelos visuais que suportam a articulação de problemas e a comunicação entre as partes interessadas, permitindo obter concordância para decisões onde exista elevada incerteza e divergências de pontos de vista. A sua representação é de fácil interpretação e atualmente existem *softwares* de fácil utilização e compreensão que reproduzem as Redes Bayesianas. Possuem uma estrutura transparente e são capazes de executar cenários de forma rápida e analisar a sensibilidade do resultado com diferentes suposições.

As principais dificuldades desta ferramenta fazem-se notar ao definir interações para sistemas mais complexos, que podem-se tornar computacionalmente intratáveis quando as tabelas de probabilidade condicional se tornam grandes; as Redes Bayesianas são de carácter estático e não incluem rondas de obtenção de *feedback*; a definição de parâmetros requer muito conhecimento de probabilidade condicional por parte do *"expert judgement"* dos especialistas; e por vezes os utilizadores podem introduzir erros que ainda assim não impactam pela negativa o *output* final da rede.

Business impact analysis (BIA) (B.5.4)

Business Impact Analysis, ou Análise de Impacto no Negócio, analisa a forma como incidentes e eventos afetam as operações de uma organização e identifica e quantifica os recursos necessários para geri-los.

Segundo a norma ISO 31010 (ISO, 2019), a BIA é utilizada para determinar a criticidade e os prazos de recuperação dos processos e recursos associados (por exemplo, pessoas, equipamento e tecnologias da informação) para permitir um planeamento adequado de eventos disruptivos. Esta análise ajuda também na determinação das interdependências e inter-relações entre processos, partes internas e externas e quaisquer ligações da cadeia de abastecimento, e fornece informações que ajudam a organização a determinar e selecionar estratégias de continuidade de negócios apropriadas que garantem uma rápida resposta e recuperação de um incidente.

Esta análise pode ser realizada por meio de questionários, entrevistas, workshops estruturados ou uma combinação de todos esses métodos, onde se recolhem informações relativas aos objetivos, direção estratégica, ativos, interdependências da organização, detalhes das suas atividades e operações, cadeias de abastecimento, acordos com terceiros e partes interessadas, *outputs* de avaliações de risco anteriores e análises de incidentes críticos, etc.

Da análise resulta uma lista priorizada de produtos, serviços e processos críticos e interdependências associadas da organização; impactos causados por processos críticos, incluindo financeiros, legais, ambientais e operacionais; informações sobre

recursos auxiliares e atividades necessárias para restabelecer processos críticos e prazos priorizados.

Por um lado a BIA destaca as principais áreas de melhoria do negócio, fornece informações necessárias para dar resposta a eventos disruptivos, e fornece uma oportunidade para que se redefinam processos operacionais dentro de uma organização, auxiliando a melhoria continua e resiliência de uma organização mas, por outro lado, depende do conhecimento e das perceções dos envolvidos podendo haver expectativas simplistas ou excessivamente otimistas que, dependendo da dinâmica do grupo, podem prejudicar a análise completa de um processo crítico.

Análise de causa-consequência (B.5.5)

Esta ferramenta é uma combinação da árvore de falhas e árvore de eventos. Começa a partir de um evento crítico e analisa as suas consequências por meio de uma combinação de portas lógicas do tipo Sim/Não, que representam condições que podem ocorrer ou falhas de sistemas projetados para atenuar as consequências do evento inicial. À semelhança da análise de árvore de falhas, a análise de causa-consequência é utilizada para representar a lógica da falha que leva a um evento crítico, mas, para além disso, permite que as falhas sequenciais de tempo sejam também analisadas.

Este método permite integrar tempos de atraso na análise da consequência, o que não é possível na árvore de eventos, e é utilizado para analisar os vários caminhos que um sistema poderia tomar perante um evento crítico em função do comportamento dos subsistemas específicos, como por exemplo sistemas de resposta de emergência. Ao quantificarem-se esses caminhos, é possível obter-se a probabilidade de diferentes consequências possíveis após um evento crítico.

É elaborada sob a forma de um diagrama (Figura 3.7), que apresenta algum grau de complexidade, sendo utilizada quando a magnitude da consequência potencial de falha justifica esforços mais intensivos. Inicialmente começa-se por identificar o evento crítico; de seguida desenvolve-se o diagrama quanto às causas do evento; decide-se a ordem em que as condições são consideradas; e constroem-se os caminhos para as consequências.

Como *output* da análise de causa-consequência obtém-se uma representação esquemática de como um sistema pode falhar mostrando tanto as causas como as consequências, além de uma estimativa da probabilidade de ocorrência de cada consequência potencial com base na análise das probabilidades de ocorrência de condições específicas após o evento crítico.

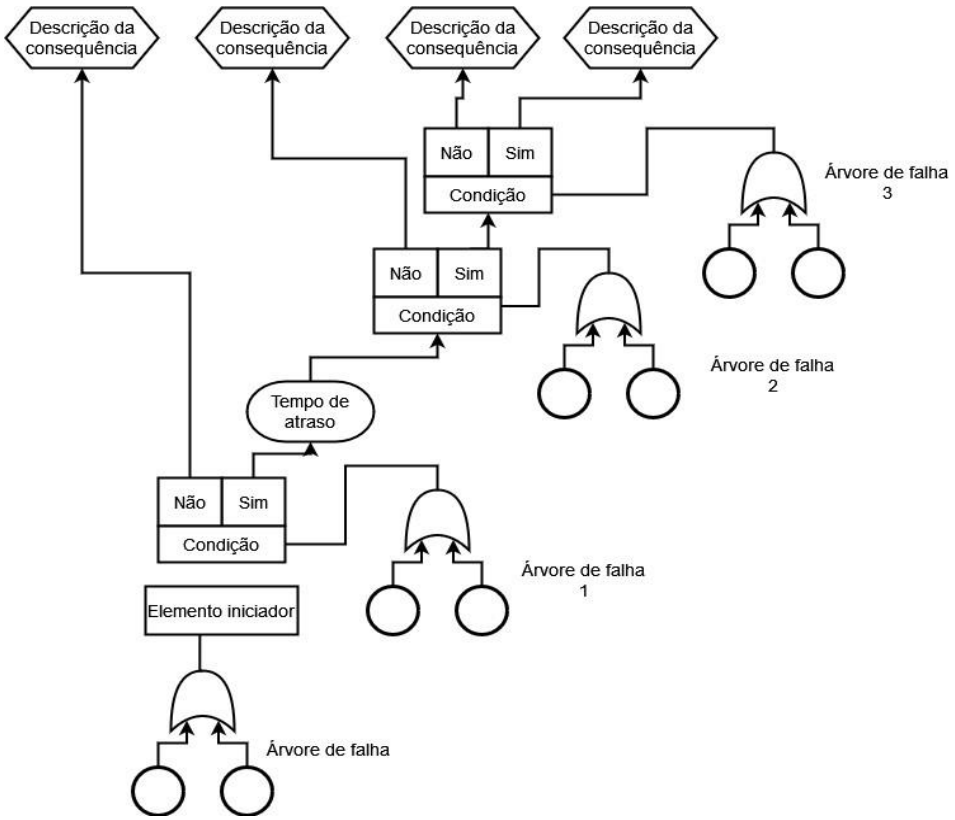


Figura 3.7 - Exemplo de diagrama de causa-consequência. Fonte: Adaptado de Hayrton (2012).

Para além de partilhar os pontos fortes com a análise de árvore de falhas e eventos, é capaz de representar em simultâneo as causas e consequências de um evento e as suas dependências de tempo. Por outro lado, é mais complexo do que essas análises, tanto na construção quanto na maneira como as dependências são tratadas durante a quantificação.

Event Tree Analysis (ETA) (B.5.6)

Event Tree Analysis, ou análise de árvore de eventos, é uma técnica que permite avaliar as consequências de um potencial acidente que resulte de uma falha num equipamento ou de anomalias no processo, denominado evento. Cada ramo da árvore pode ser quantificado permitindo posteriormente calcular as diferentes probabilidades dos resultados possíveis.

Esta análise começa com um evento inicial e de seguida desenham-se linhas, que percorrem cada um dos controlos do processo ou equipamento, e que permitem representar o seu sucesso ou a sua falha. A probabilidade de sucesso ou falha de cada controlo é do tipo condicional, que está relacionada com o evento inicial, e é atribuída a cada controlo pelo julgamento de especialistas a partir de dados ou análises de árvore de falhas individuais.

A análise de árvore de falhas pode ser utilizada de forma qualitativa, para analisar possíveis cenários e consequências de eventos após um evento inicial e para

explorar como os resultados podem ser afetas pelos vários controlos, ou pode ser utilizada quantitativamente, quando se pretende considerar a aceitabilidade dos controlos e a importância relativa de diferentes controlos para o nível geral de risco.

Esta é um técnica que permite assim identificar falhas e vulnerabilidades de um sistemas ou processo, podendo também ser utilizada para melhorar a eficiência dos controlos, mas por outro lado, para análises mais abrangentes é necessário que se identifiquem todos os eventos iniciais possíveis e existe dependência ao longo dos caminhos possíveis, isto é, qualquer caminho está condicionado pelos eventos que ocorreram em pontos de ramificações anteriores, pelo que para sistemas mais complexos a análise de árvore de eventos pode ser difícil de contruir de raiz.

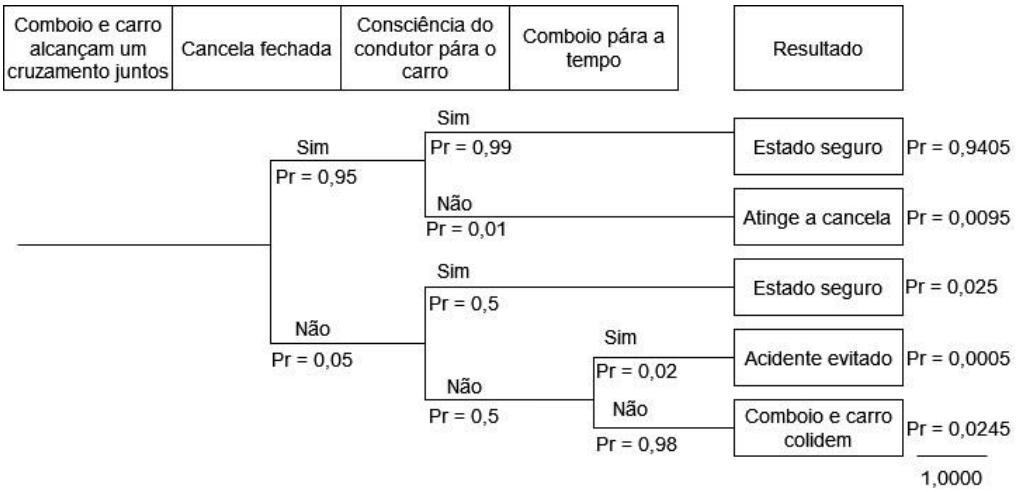


Figura 3.8 - Exemplo de uma análise de árvore de eventos. Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019

Fault Tree Analysis (FTA) (B.5.7)

A análise de árvore de falhas (FTA), é uma técnica que permite identificar a causa raiz de uma falha; perceber como é que o sistema pode falhar; determinar os riscos associados ao sistema; estimar a frequência de acidentes; tudo isso através de um diagrama. Embora seja utilizada para analisar uma única ocorrência indesejada, permite também avaliar sistematicamente o funcionamento de um conjunto de componentes.

O ponto de partida para a análise de árvore de falhas é a própria falha. A partir daí, vai-se desenvolvendo o diagrama com as potenciais causas seguindo uma sequência lógica booleana, com símbolos que representam cada um dos eventos que pode ter potenciado a falha, ligados entre si por portas lógicas "*and*", "*or*" ou outras. Normalmente este tipo de diagrama é integrado com conceitos de probabilidade e estatística, transformando a FTA num método quantitativo. Assim, torna-se possível estimar os riscos de um sistema, a probabilidade de ocorrerem e a magnitude das suas consequências.

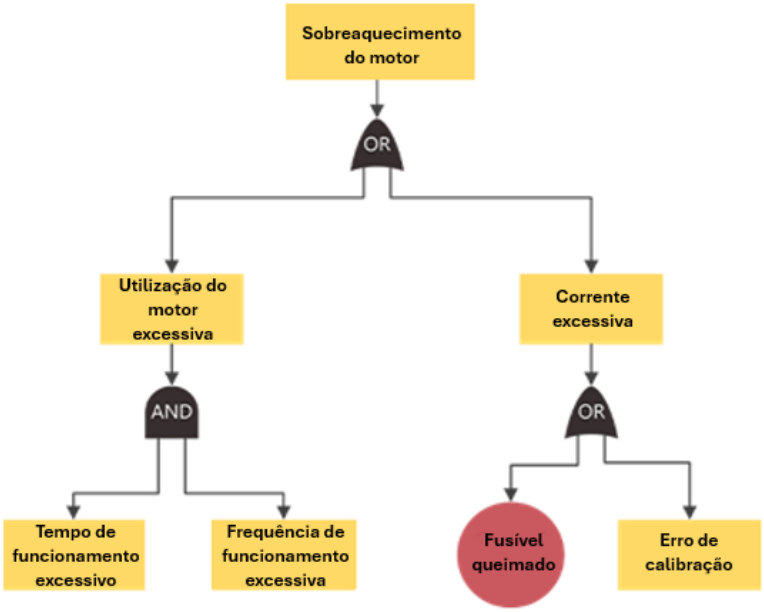


Figura 3.9 - Exemplo de uma Análise de Árvore de Falhas.
Fonte: Adaptado de (Microsoft, s.d.)

Investigar a causa raiz permite fazer alterações ao plano de manutenção, implementar novas normas de segurança e estimar o risco associado a um ativo. Isto leva ao aperfeiçoamento das estratégias de manutenção da empresa a uma maior disponibilidade e fiabilidade dos ativos (Infraspeak Team, 2023).

Por outro lado, apresenta algumas limitações como:

- É um modelo estático, que não tem em consideração o tempo e a vida útil dos ativos, o que pode ser importante quando estamos a analisar o sistema ainda numa fase de conceito ou de projeto.
- Consiste num sistema binário – cada hipótese ou é validada ou descartada, correspondente a 1 ou a 0, o que o torna demasiado "rígido" quando há muitas condicionantes (a falha só ocorre em determinadas situações) ou falhas parciais.
- Nem sempre é possível determinar a probabilidade de uma falha ocorrer, o que impossibilita o uso da FTA como um método quantitativo.

Human Reliability Analysis (HRA) (B.5.8)

A análise de fiabilidade humana tem por base um conjunto de técnicas que visam avaliar a contribuição humana para a fiabilidade e segurança de um sistema, identificando e analisando o impacto de uma ação incorreta. Esta ferramenta é aplicada ao nível estratégico em tarefas específicas que exigem um desempenho correto.

Numa fase inicial é feita uma análise hierárquica de tarefas para identificar etapas e sub-etapas dentro de uma atividade, onde se aplicam mecanismos baseados em palavras-chave (muito cedo, muito tarde, ação incorreta, objeto incorreto, objeto correto, etc.) para identificar potenciais erros. Posteriormente identificam-se as fontes

desses erros (distração, tempo disponível muito curto, etc.) e tomam-se medidas no sentido de reduzir a probabilidade de erro na tarefa. A probabilidade de ocorrer uma ação indesejada pode ser obtida com recurso à consulta de histórico de bases de dados de tarefas semelhantes ou julgamento de especialistas.

Esta análise pode ser utilizada qualitativamente durante um projeto, para que os sistemas sejam projetados para minimizar a probabilidade de erro humano; durante a modificação de um sistema para melhorar procedimentos; para identificar e reduzir fatores que contribuam para o erro dentro do ambiente organizacional. Por outro lado, pode ser utilizada de forma quantitativa permitindo fornecer dados sobre o desempenho humano a outras técnicas de avaliação de risco.

Análise de Markov (B.5.9)

Segundo a Norma ISO 31010 (ISO, 2019), a análise de Markov é uma técnica quantitativa que pode ser aplicada a qualquer sistema que possa ser descrito em termos de um conjunto de estados discretos e transições entre eles, desde que a evolução do seu estado atual não dependa do seu estado em nenhum momento no passado.

Esta análise é representada no diagrama de Markov, Figura 3.10, em que os círculos representam os estados e as setas representam as transições entre estados e as suas probabilidades de transição associadas.

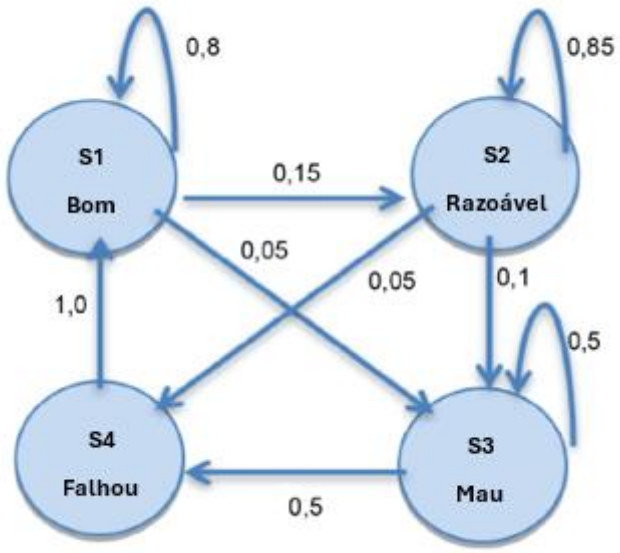


Figura 3.10 - Exemplo de diagrama de Markov. Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019

O sistema ilustrado na Figura 3.10 pode também ser representado sob a forma de uma matriz conforme a Tabela 3.3. Como se pode observar, a soma de cada uma das linhas é igual a 1, uma vez que os valores representam as probabilidades de todas as transições possíveis em cada caso.

Tabela 3.3 - Exemplo de matriz de Markov. Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019

		Próximo estado após a transição			
		S1, Bom	**S2, Razoável**	**S3, Mau**	**S4, Falhou**
Estado atual	**S1, Bom**	0,8	0,15	0,05	0
	S2, Razoável	0	0,85	0,1	0,05
	S3, Mau	0	0	0,5	0,5
	S4, Falhou	1	0	0	0

A Análise de Markov pode ser utilizada para estimar a probabilidade de a longo prazo o sistema estar num determinado estado, para estimar o tempo esperado até à falha de um sistema complexo ou o tempo esperado para o sistema retorne a um estado específico. É uma análise que apresenta pontos fortes como a sua capacidade de modelar sistemas dinâmicos e o facto dos seus diagramas oferecerem estruturas simples de fácil interpretação, mas por outro lado, as probabilidades de transição podem mudar ao longo do tempo à medida que o sistema se deteriora ou se altere, e diagramas mais robustos exigem uma recolha e validação de dados mais rigorosa.

Simulação de Monte Carlo (B.5.10)

A Simulação de Monte Carlo é uma técnica capaz de prever um conjunto de resultados com base num intervalo de valores estimados em relação a um conjunto de valores de entrada fixos, isto é, utilizando uma distribuição de probabilidade, do tipo uniforme, normal, logarítmica, etc., para qualquer variável que tenha uma incerteza inerente, a simulação de Monte Carlo permite criar um modelo de resultados possíveis. Pode ser utilizada como parte da avaliação de risco para efetuar cálculos probabilísticos quando as técnicas analíticas não funcionam ou não são visíveis,

Esta ferramenta é utilizada para previsões a longo prazo devido à sua precisão, precisão essa que aumenta à medida que a quantidade de informação aumenta, permitindo projetar resultados mais distantes no tempo e com maior exatidão. Como resultado da simulação, obtém-se uma variedade de resultados possíveis com a probabilidade de ocorrência de cada resultado.

Como principais pontos fortes desta simulação destacam-se os modelos utilizados, que são relativamente simples de desenvolver e de fácil interpretação, uma vez que a relação entre entradas e saídas é transparente, podem também ser ampliados de acordo com as necessidades. Com recurso a análises de sensibilidade é possível identificar influências fortes e fracas.

Por outro lado, a precisão das soluções depende do número de simulações que podem ser realizadas; a utilização desta técnica depende da capacidade de representar incertezas nos parâmetros por uma distribuição válida; modelos com maior grau de complexidade são mais difíceis de modelar e dificultam o envolvimento das partes

interessadas; e é uma técnica que tende a não destacar riscos de elevada consequência ou de baixa probabilidade.

Privacy Impact Analysis (PIA) / *Data Protection Impact Analysis* (DPIA) (B.5.11)

De acordo com a Norma ISO 31010 (ISO, 2019), os métodos de análise de impacto de privacidade (PIA) e análise de impacto de proteção de dados (DPIA), analisam o modo como incidentes e/ou eventos podem afetar a privacidade de um individuo e identificam e quantificam os recursos necessários para geri-los.

Estas ferramentas permitem que as organizações sejam capazes de identificar, avaliar e tratar os riscos de privacidade associados às atividades de proteção de dados bem como auxiliam no cumprimento de requisitos reguladores de proteção de dados, como o Regulamento de Proteção de Dados da União Europeia (RGPD).

Os principais *inputs* destas análises incluem informações relativas a objetivos, direção estratégica, ambiente, ativos, interdependências da organização, bem como resultados de outras avaliações de risco e análises de incidentes críticos relacionados e informação detalhada das atividades da organização ao lidar com informações pessoais, entre outros. Como resultado obtém-se uma lista priorizada de processos de informações críticas e interdependências associadas; os possíveis impactos que uma fuga ou perda de informação pessoal possa causar; uma avaliação dos impactos a longo prazo

Em suma, estas análises fornecem uma compreensão mais aprofundada dos processos críticos que lidam com informações pessoais sensíveis, dentro ou em nome de uma organização; avaliam a implementação dos princípios de privacidade; permite redefinir e reconsiderar o processamento operacional de dados pessoais.

Por outro lado, é necessário que haja uma triagem do impacto na privacidade, para evitar que existam cálculos simplistas ou que subestimem a gravidade de um potencial risco; são análises que dependem do conhecimento e da perceção dos envolvidos, e a dinâmica do grupo e a pressão do tempo podem afetar negativamente a análise de um processo crítico.

3.4.6 Técnicas para análise de dependências e interações

Mapeamento causal (B.6.1)

O mapeamento causal é uma ferramenta que recolhe as perceções individuais sob a forma de redes de argumentos que são representadas num mapa passível de análise. É um processo de construção, resumo e elaboração de inferências a partir de um mapa causal.

Os dados que alimentam o desenvolvimento de mapas causais podem resultar da realização de entrevistas ou podem ser extraídos de documentação e relatórios

existentes. Por sua vez, os mapas causais podem ser utilizados proativamente para recolher uma avaliação abrangente e sistemática dos cenários possíveis dos eventos. As saídas deste processo devem fornecer informações relevantes que sustentem as decisões da gestão do risco.

Como pontos fortes desta ferramenta destacam-se a consideração das múltiplas perspetivas dos participantes; a natureza divergente e aberta do processo permite que o risco seja explorado reduzindo a probabilidade de negligenciar eventos ou interações críticas; o processo permite a recolha eficaz e eficiente das interações entre eventos e fornece uma compreensão do seu relacionamento; o processo de determinação da rede de eventos que formam o mapa pode construir uma linguagem e compreensão comum que são essenciais para um gestão do risco eficaz.

Por outro lado, o processo de mapeamento exige habilidade técnica, os mapas são de natureza qualitativa, e o conteúdo do mapa é determinado pelas fontes, pelo que é necessário que exista uma consideração cuidadosa dos participantes.

Análise de impacto cruzado (B.6.2)

Segundo a Norma ISO 31010 (ISO, 2019), uma análise de impacto cruzado consiste numa família de técnicas destinadas a avaliar mudanças na probabilidade de ocorrência de um determinado conjunto de eventos consequentes da ocorrência real de um deles.

A análise envolve a construção de uma matriz, em que as linhas representam os conjuntos de eventos e ou tendências que podem ocorrer, e as colunas representam os eventos e ou tendências que seriam afetados. Assim, torna-se necessário estimar a probabilidade de cada evento de forma isolada num determinado horizonte temporal, bem como a probabilidade condicional de cada evento dado que outro evento ocorra. Utilizando como forma complementar a esta análise a simulação de Monte Carlo (B.5.10), com recurso a um *software*, é possível estimar as probabilidades de um evento bem como a sua condicional perante outro evento, necessárias à construção da matriz. À medida que se vai iterando e executando a simulação de Monte Carlo, obtêm-se novas probabilidades de ocorrência de cada evento.

Posteriormente, é realizada uma análise de sensibilidade sobre uma estimativa de probabilidade inicial ou condicional que suscite uma incerteza associada. Dessa análise resulta uma alteração matricial e executa-se uma nova análise. Como resultado final da análise obtém-se uma lista de possíveis cenários futuros.

Esta análise é normalmente utilizada em estudos de previsão, como técnica analítica para prever como diferentes fatores impactam decisões futuras, e como ferramenta de gestão de riscos de segurança, com um horizonte temporal de médio a

longo prazo. É relativamente fácil de implementar um questionário de impacto cruzado e é útil para explorar uma hipótese e encontrar pontos de concordância e divergência.

Porém apresenta algumas limitações como o facto do número de eventos que podem ser incluídos ser limitado, tanto a nível da capacidade do *software* como pelo tempo que é exigido aos especialistas; o número de probabilidades condicionais e de execuções necessárias aumenta com o aumento do número de eventos incluídos (ex: 10 eventos dão origem a 90 probabilidades condicionais); a inclusão de eventos irrelevantes complica a análise final de resultas; o método utilizado na construção da análise depende do conhecimento dos entrevistados.

3.4.7 Técnicas que fornecem uma medida de risco

Value at Risk (VaR) (B.7.2)

Valor em risco (VaR – *Value at Risk*) é amplamente aplicado no setor financeiro e fornece um indicador de perda possível numa carteira de ativos financeiros durante um horizonte temporal específico dentro de um determinado nível de confiança.

O VaR tem três parâmetros: uma quantidade de perda potencial, a probabilidade dessa quantidade de perda e o período de tempo durante a qual a perda pode ocorrer. Este indicador permite estabelecer limites para um gestor sobre a perda máxima no portefólio dentro de uma tolerância ao risco acordada ou apetite ao risco; monitorizar o risco de uma carteira de ativos; determinar quanto ao capital económico, prudencial ou regulatório é necessário reservar para uma carteira específica; reportar a reguladores. Os principais inputs deste indicador são fatores de mercado que afetam o valor da carteira, como taxas de câmbio, taxas de juros e preços de ações.

Por outro lado, o VaR é apenas um indicador e não uma estimativa específica de uma possível perda, e possui várias propriedades matemáticas indesejáveis, isto é, apesar de ser uma medida de risco coerente quando baseada numa distribuição de probabilidade normal, deixa de o ser quando baseado noutra tipo de distribuições. Para além do mais, os modelos de simulação podem tornar-se complexos e demorados para serem executados.

Conditional Value at Risk (CVaR) ou *Expected Shortfall* (ES) (B.7.3)

Conditional Value at Risk (CVaR) ou *Expected Shortfall* (ES), em português Valor Condicional em Risco, ou déficit esperado, é uma medida semelhante ao VaR, no entanto, é mais sensível à forma da cauda inferior (perda) da distribuição do valor do portefólio. O CVaR é a perda esperada das perdas que ocorreram numa determinada percentagem do tempo.

As técnicas do Valor Condicional em Risco são normalmente aplicadas ao risco de crédito, porque são capazes de fornecer aos credores uma visão sobre as mudanças do risco extremo em todos os setores desde o início de uma crise financeira.

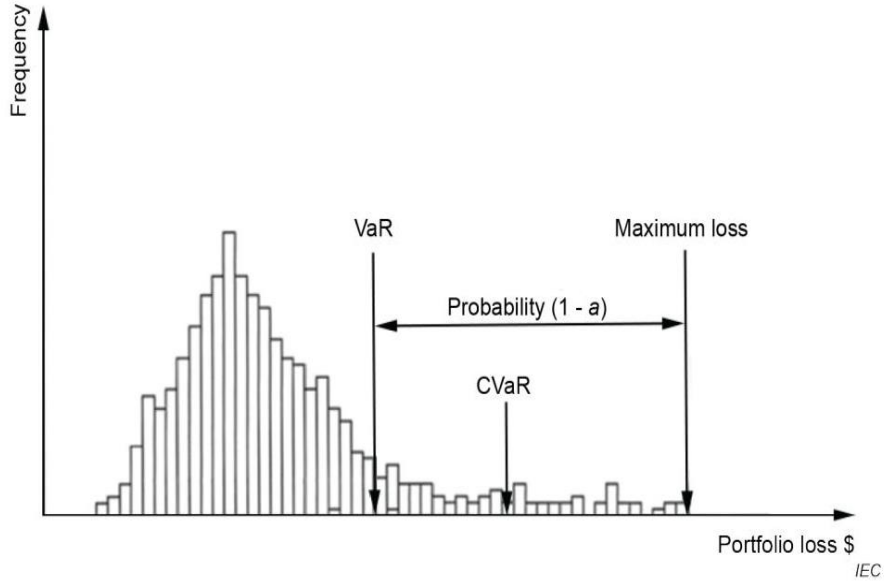


Figura 3.11 - VaR e CVaR de uma possível perda num portefólio. Fonte: norma ISO 31010:2019

Ao contrário do VaR, o CVaR evita algumas limitações matemáticas do VaR e é mais conservador na medida em que se concentra mais nos resultados que geram maiores perdas.

Por outro lado, é também apenas um indicador de potencial perda e não uma estimativa de perda máxima admissível. Baseia-se numa matemática complexa, requer uma grande variedade de suposições e é sensível a premissas fundamentais sobre a volatilidade do valor do ativo.

3.4.8 Técnicas para avaliar a significância do risco

ALARP e SFAIRP (B.8.2)

ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*) e SFAIRP (*So Far As Is Reasonably Practicable*), são siglas que incorporam o princípio de “razoavelmente praticável”. Representam critérios em que o teste de aceitabilidade ou tolerabilidade de um risco é se é razoavelmente praticável fazer mais para reduzir o risco. Por um lado, o ALARP exige que o nível de risco seja reduzido ao mínimo razoavelmente praticável, enquanto o SFAIRP exige que a segurança seja garantida na medida do possível independentemente do nível do risco.

ALARP e SFAIRP apresentam-se como dois critérios utilizados para decidir se existe necessidade ou não de tratar um risco. Normalmente são aplicados a riscos relacionados com segurança e são utilizados por alguns legisladores.

O modelo ALARP pode ser utilizado para classificar o risco numa das três categorias ilustradas na Figura 3.12:

Figura 3.12 - Diagrama ALARP. Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019

Para aplicar estes critérios torna-se necessário identificar a origem do risco e o risco associado, definir os critérios para os limites à região ALARP, definir os controlos a aplicar, identificar as potenciais consequências que advém do risco bem como as suas probabilidades, e o custo associado ao tratamento do risco. Como resultado da aplicação destes critérios, obtém-se uma decisão sobre se é ou não necessário um tratamento e qual deverá ser o tratamento a aplicar.

De acordo com a norma ISO 31010 (ISO, 2019), tanto o ALARP como o SFAIRP definem um padrão comum de entendimento, com base na legislação, que apoia o principio da equidade em que todos os indivíduos têm direito a um nível igual de proteção contra riscos considerados por lei e não uma variável considerada tolerável ou aceitável pela sua organização; apoiam o princípio da utilidade, isto é, a redução dos riscos não deve exigir mais esforço do que o razoavelmente praticável; permite o estabelecimento de metas; apoia a melhoria continua com o objetivo de minimizar riscos; e fornece uma metodologia transparente e objetiva para discutir e determinar a aceitabilidade ou tolerabilidade do risco com as partes interessadas.

Contudo, a sua interpretação pode ser desafiadora porque exige que a organização entenda o contexto legislativo do razoavelmente praticável; a sua aplicação a novas tecnologias pode apresentar algumas dificuldades na medida em que não se conhecem os riscos nem os seus possíveis tratamentos; e o facto de estabelecerem um padrão comum de cuidado podem não ser financeiramente viáveis para organizações de menor dimensão.

Diagramas F-N (B.8.3)

Os Diagramas F-N são uma representação gráfica do nível de risco social, onde o eixo XX representa o número cumulativo de fatalidades (N) e o eixo YY a frequência com que estas ocorrem (F). Trata-se de escalas logarítmicas que se ajustam a dados reais. Do gráfico faz também parte uma reta, designada por “valor de referência”, que representa o nível máximo do critério de aceitação de risco aplicável. Quanto maior a inclinação da reta maior a aversão a um maior número de fatalidades.

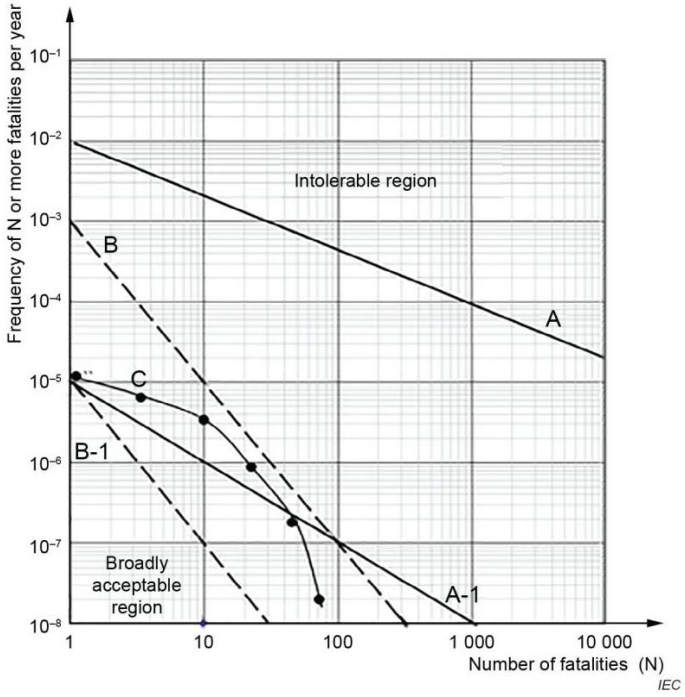


Figura 3.13 - Exemplo de um diagrama F-N. Fonte: Norma ISO 31010:2019

No diagrama F-N da Figura 3.13 estão ilustrados dois exemplos de critérios identificados como (A e A-1) e (B e B-1). Acima de A ou B encontra-se a região intolerável, abaixo de A-1 e B-1 a região aceitável e uma região entre as duas anteriores, onde os riscos são aceitáveis se forem tão baixos quanto razoavelmente praticável (ALARP). O critério B apresenta uma inclinação mais acentuada comparativamente ao critério A, o que significa que este é mais conservador, isto é, tem uma tolerância menor à aceitação do número de fatalidades. Também é representada uma curva C que une seis pontos que correspondem a resultados de uma análise quantitativa do nível de risco que podem ser comparados com os critérios A e B.

Os diagramas F-N apresentam resultados de fácil interpretação e a análise quantitativa necessária ao seu desenvolvimento fornece uma boa compreensão do risco e das suas causas e consequências. Por outro lado, uma análise completa requer que todos os potenciais cenários de acidentes graves sejam analisados, o que leva a um grande consumo de tempo e um elevado nível de especialização.

Diagrama de Pareto (B.8.4)

O diagrama de Pareto, também conhecido como análise ABC, é uma ferramenta que permite identificar de forma rápida as causas ou problemas mais importantes e que têm maior impacto numa organização, seguindo o princípio 80/20. Este princípio defende que 80% dos problemas são originados por 20% das causas, ou seja, um número reduzido de causas origina a maioria dos problemas e, por isso, é nestas que se devem concentrar as ações de melhoria iniciais. É constituído por um gráfico de barras com as frequências das ocorrências dos problemas ordenadas de forma crescente, evidenciando as prioridades de atuação, e uma linha que representa a percentagem acumulada da frequência das ocorrências.

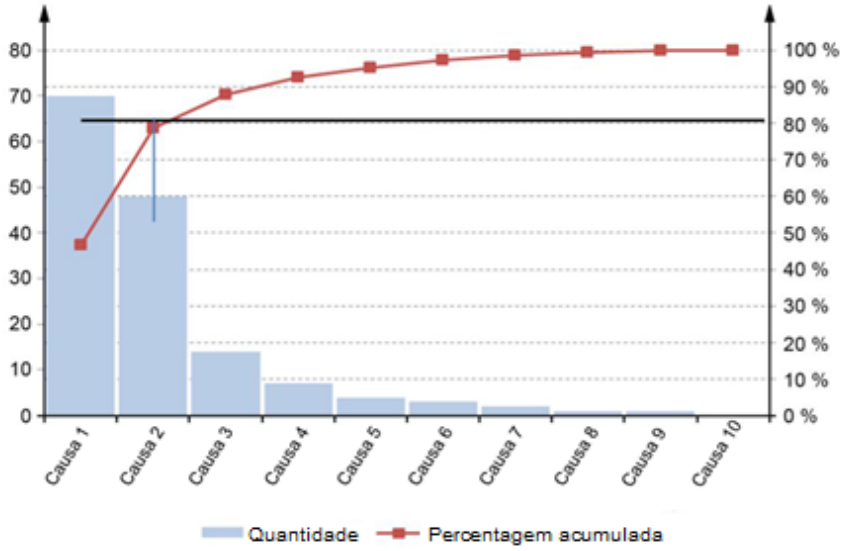


Figura 3.14 - Diagrama de Pareto. Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019

Este diagrama é útil ao nível operacional, uma vez que destaca por ordem de prioridade quais as causas mais importantes a serem abordadas, para que o esforço possa ser concentrado nas áreas que necessitem de uma atuação mais prioritária. Tipicamente as categorias do eixo das abcissas estão relacionadas com defeitos, fontes de defeitos ou entradas de um processo, e o eixo das ordenadas representa algum tipo de contagem ou frequência como ocorrências, incidentes, tempo, etc.

Em suma, esta ferramenta permite identificar as causas que permitem obter maiores ganhos, exigindo um nível de esforço e tempo relativamente baixo. No entanto, os dados utilizados devem ser divididos em categorias por forma a que a regra 80/20 seja válida. Por vezes quando os dados são inadequados torna-se difícil construir pesos relativos.

Reliability Centred Maintenance (RCM) (B.8.5)

Segundo a norma ISO 31010 (ISO, 2019), *Reliability Centred Maintenance* (RCM), em português Manutenção Centrada na Fiabilidade, é uma técnica de avaliação baseada em risco utilizada para identificar políticas e tarefas de manutenção apropriados a um sistema e aos seus componentes, de modo a alcançar de forma eficiente e eficaz a segurança, disponibilidade e economia no funcionamento de todos os equipamentos.

Dentro da RCM são realizadas análises funcionais, normalmente do tipo FMECA, com foco em situações onde se possam mitigar as potenciais falhas ou reduzir a frequência com que ocorrem realizando tarefas de manutenção. Posteriormente estabelecem-se as consequências segundo a definição dos efeitos da falha e analisa-se o risco pela estimativa da frequência de cada modo de falha sem manutenção. Numa terceira fase seleciona-se as tarefas de manutenção mais adequadas e é traçado um plano detalhado para implementar as mesmas, que deve incluir os tempos de cada operação, procedimentos, peças sobresselentes e outros recursos necessários ao desempenho das tarefas.

A RCM é aplicada na fase de projeto e desenvolvimento e implementada durante a operação e manutenção. Uma aplicação bem-sucedida requer um bom conhecimento do equipamento e infraestrutura, do ambiente operacional e dos sistemas, subsistemas e componentes associados a um equipamento, tendo presente as possíveis falhas que possam ocorrer e as suas consequências. Permite ser aplicada aos mais diversos tipos de manutenção, sejam do tipo preventiva, corretiva ou preditiva.

Esta técnica permite que a magnitude do risco seja utilizada para tomar decisões de manutenção, no entanto, as tarefas são avaliadas de modo a garantir a sua rentabilidade e viabilidade, pelo que, ações de manutenção desnecessárias são eliminadas e devidamente justificadas. Todo o processo e decisões são documentados para revisão posterior.

As principais limitações prendem-se com o facto de ser um processo demorado, que exige experiência e conhecimento de manutenção, e por vezes pode haver alguma tendência em saltar passos do processo, com impacto negativo na validade das decisões tomadas.

Índices de Risco (B.8.6)

Os Índices de Risco são uma abordagem qualitativa ou semiquantitativa para classificar e comparar riscos. Podem ser aplicados a riscos internos ou externos à organização e são específicos para determinado tipo de risco. Nos casos em que o modelo é bem conhecido e permita que seja representado é utilizada a abordagem semiquantitativa, onde se utilizam escalas ordinais e atribuem-se pontuações baseadas

em evidências e dados históricos. Nos casos em que isso não é possível opta-se por uma abordagem mais qualitativa que não implique um nível de precisão que seja impossível usando escalas ordinais.

As entradas necessárias à criação de um Índice de Risco são derivadas da análise do sistema, pelo que é necessário ter bom conhecimento de todas as fontes de risco e as suas consequências. Para além do mais podem ser utilizadas ferramentas como a FTA, ETA, MCA e dados históricos para apoiar o desenvolvimento dos índices. A saída é uma série de números que se relacionam a um determinado risco e que podem ser comparados com índices desenvolvidos para outros riscos dentro do mesmo sistema.

Esta é uma ferramenta simples e fácil de utilizar para classificar diferentes riscos e permitem que múltiplos fatores que afetam o nível de risco sejam incorporados numa única pontuação numérica. No entanto, se o processo e a saída do mesmo não forem corretamente validados os resultados podem não fazer sentido. Muitas vezes é difícil obter evidências suficientes para validar as escalas utilizadas e, em algumas situações, não existe um modelo fundamental que defina que tipo de escala é o mais apropriado para fatores de risco (logarítmica, linear, etc.) e também não há nenhum modelo que defina como deverão ser combinados os vários fatores.

3.4.9 Técnicas para selecionar entre opções

Análise de custo/benefício (B.9.2)

Uma análise custo/benefício pesa os custos totais esperados das várias opções em relação aos benefícios totais esperados, com o objetivo de escolher a opção mais eficaz ou mais lucrativa. Pode ser de caráter qualitativo, quantitativo ou uma combinação dos dois, e pode ser aplicado a qualquer nível organizacional.

Numa análise qualitativa, os resultados são apresentados sob a forma de uma tabela onde se comparam custos e benefícios de diferentes tipos. Numa análise de custo/benefício quantitativa é atribuído um valor monetário a todos os custos e benefícios. Por vezes os custos e os benefícios incorrem em períodos de tempo diferentes pelo que se torna necessários trazê-los para o valor atual, por forma a que a sua comparação seja válida. Subtraindo o valor atual dos benefícios (VAB) pelo valor atual dos custos (VAC) obtém-se o valor atual líquido (VAL):

$$VAL = VAB - VAC \tag{3.2}$$

Um VAL positivo significa que a opção pode ser economicamente vantajosa, isto é, a sua execução cobrirá o investimento inicial gerando ainda um excedente financeiro. Se o VAL for igual a zero significa que é indiferente executar ou não o projeto, dada a incerteza associada aos *cash-flows* que suportam a análise, no entanto pode-se considerar elevada a probabilidade de o projeto se revelar inviável. Por outro lado, se o

VAL for negativo significa que o projeto é economicamente inviável. Nem sempre a opção com o VAL maior é a opção mais adequada. A decisão deve ser combinada com a escolha estratégica entre opções satisfatórias que possam oferecer individualmente um menor custo, maior benefício ou melhor valor.

Na maioria dos casos as opções envolvem incertezas, pelo que a variabilidade esperada do VAB e VAC bem como a possibilidade de ocorrerem eventos inesperados devem ser tidos em conta na análise. Para tal é habitual utilizarem-se análises de sensibilidade ou análise de Monte Carlo.

Esta análise permite assim comparar custos e benefícios utilizando uma única métrica, fornece transparência nas informações necessárias à tomada de decisões e incentiva à recolha das mesmas de forma detalhada. Por outro lado, requer um bom entendimento dos benefícios mais prováveis, não se adequando assim a situações novas e de elevada incerteza.

Análise de árvore de decisão (B.9.3)

Uma árvore de decisão representa num fluxograma os caminhos possíveis decorrentes de uma decisão inicial que deve ser tomada (Ex: prosseguir com o Projeto A ou com o Projeto B). À medida que os projetos hipotéticos avançam, ocorre uma série de eventos e decisões que precisam de ser tomadas. A probabilidade dos eventos pode ser estimada bem como o valor esperado ou a utilidade do resultado final de cada caminho.

Esta análise pode ser utilizada para estruturar e resolver problemas de decisão sequencial e apresenta-se especialmente benéfica quando a complexidade do problema aumenta. Permite também quantificar que uma organização quantifique os possíveis resultados das decisões, ajudando os decisores na escolha do melhor caminho quando os resultados são incertos.

Desenvolver uma árvore de decisões requer um plano de projeto com pontos de decisão, informação sobre possíveis resultados de decisões e sobre eventos que possam afetar as decisões tomadas. É necessária experiência para configurar uma árvore de forma correta, especialmente em situações mais complexas.

Assim, uma análise de árvore de decisões é uma ferramenta que fornece uma visão gráfica clara dos detalhes de um problema de decisão; a sua construção leva a uma melhor compreensão do problema; incentiva o pensamento claro e o planeamento; permite o cálculo do melhor caminho e pode ser aplicada a curto, médio e longo prazo ao nível operacional ou estratégico.

Por outro lado, grandes árvores de decisão podem se tornar complexas; por vezes pode haver uma tendência de simplificar demais a situação para que se possa

representá-la neste formato; e baseia-se em dados históricos que podem não se aplicar à decisão modelada.

Teoria dos jogos (B.9.4)

A teoria dos jogos é uma forma de modelar as consequências de diferentes decisões possíveis dadas várias situações possíveis. Existem vários tipos de jogos como o cooperativo/não cooperativo, simétrico/assimétrico, soma zero/soma diferente de zero, simultâneo/sequencial, informação perfeita/informação imperfeita, jogos combinatórios, entre outros.

- Comunicação e jogos cooperativos/não cooperativos: Um fator importante é se a comunicação entre os jogadores é permitida ou possível. Num jogo cooperativo os jogadores são capazes de formar compromissos obrigatórios, ao contrário dos jogos não cooperativos onde não existe essa possibilidade. Este tipo de jogos é utilizado para analisar o conflito e a cooperação entre jogadores onde a falta de comunicação pode causar uma situação instável que pode causar os piores resultados possíveis a ambos os jogadores.
- Jogos soma zero/soma diferente de zero: Nos jogos soma/zero quando um jogador ganha o outro perde (Ex: jogos clássicos de tabuleiro), já nos jogos soma diferente de zero o ganho de um jogador não implica a perda de outros (Ex: dilema do prisioneiro).
- Jogos simultâneos/sequenciais: Os jogos simultâneos são jogos onde ambos os jogadores se movem simultaneamente, enquanto os jogos sequenciais são jogos onde o próximo jogador tem conhecimento da jogado do seu antecessor.

A teoria dos jogos permite que o risco seja avaliado nos casos em que o resultado de uma série de decisões depende da ação de um concorrente ou de vários resultados possíveis. A Tabela 3.4 ilustra um exemplo em que uma empresa pode escolher entre três tecnologias diferentes. O lucro depende da ação (1, 2 ou 3) que o concorrente terá (Valor em milhões de Unidades Monetárias (UM)).

Tabela 3.4 - Exemplo de uma matriz de jogo. Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019

	Concorrente			**Lucro esperado (UM)**	**Lucro garantido (UM)**	**Arrependimento máximo**
	Ação 1	**Ação 2**	**Ação 3**			
Probabilidade	0,40	0,50	0,10			
Tecnologia 1	0,10	0,50	0,90	0,38	0,10	0,50
Tecnologia 2	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,40
Tecnologia 3	0,60	0,60	0,30	0,57	0,30	0,60

Analisando a Tabela 3.4, a Tecnologia 3 é a que apresenta o maior lucro esperado, no entanto, é importante considerar a sensibilidade à ação do concorrente.

Na coluna do lucro garantido a melhor Tecnologia 2 é a que apresenta o valor mais elevado, valor esse que é independente da ação que o concorrente tome. Deve, portanto, considerar-se se vale a pena escolher a Tecnologia 3 em virtude da 2 só por ter um valor de lucro esperado superior em 0,07 milhões de UM, arriscando a perda de 0,20 milhões de UM (diferença entre lucro garantido das duas tecnologias).

Esta teoria desenvolve uma estrutura capaz de analisar a tomada de decisão onde várias decisões são possíveis, mas onde o resultado depende da decisão de outro jogador ou do resultado de um evento futuro; analisar a tomada de decisão em situações onde a interdependência de decisões tomadas por diferentes organizações é lavada em consideração.

As suas principais limitações são o facto de nem todos os problemas competitivos poderem ser analisados com recurso a esta teoria, e no caso de grandes matrizes, as técnicas de resolução de jogos envolvendo estratégias mistas tornam-se mais complexas.

Multi-criteria analysis (MCA) (B.9.5)

A Análise Multicritério (MCA) utiliza uma variedade de critérios para avaliar e comparar de forma transparente o desempenho geral de um conjunto de opções. A análise envolve o desenvolvimento de uma matriz de opções e critérios que são classificados e agregados para fornecer uma pontuação geral a cada opção. Para tal é necessário:

- Definir objetivos;
- Estruturar os atributos numa hierarquia de requisitos necessários e desejáveis;
- Determinar a importância de cada critério e atribuir pesos a cada um;
- Obter um consenso das partes interessadas quanto à hierarquia ponderada;
- Avaliar as alternativas em relação aos critérios, com recurso à utilização de uma matriz de pontuações;
- Combinar várias pontuações de atributo única numa pontuação geral ponderada de vários atributos;
- Avaliar os resultados de cada opção;
- Avaliar a solidez da classificação das opções realizando uma análise de sensibilidade.

Uma vez que as pontuações são subjetivas, torna-se útil a realização de uma análise de sensibilidade para examinar até que ponto os pesos e as pontuações influenciam as preferências gerais entre as opções. Esta análise é utilizada essencialmente para comparar várias opções para uma análise inicial, opções onde por

vezes existem critérios múltiplos que possam gerar conflitos, mas sobretudo para chegar a um consenso entre as partes interessadas. Os resultados da análise podem ser apresentados sob a forma de uma lista das opções ordenada da mais preferencial para a menos preferencial, ou sob a forma de uma matriz onde os eixos representação os pesos e a pontuação dos critérios para cada opção.

Esta análise fornece uma estrutura simples para uma tomada de decisão eficiente, uma vez que permite gerir mais facilmente problemas complexos, quando não é possível a realização de uma análise custo/benefício, e permite chegar a um consenso entre as partes interessadas, tendo em conta as diferenças que possam existir ao nível de objetivos, valores e critérios das mesmas.

Por outro lado, esta análise pode ser afetada pela má seleção dos critérios e por vezes o sistema de pontuação pode simplificar demasiado o problema de decisão.

3.4.10 Técnicas para registo e relatórios

Registo de riscos (B.10.2)

Um registo de riscos reúne a informação sobre os riscos para informar os indivíduos expostos aos mesmos bem como os responsáveis pela sua gestão, podendo ser apresentado sob a forma de papel ou em formato digital, e inclui:

- Uma breve descrição do risco (nome, consequências e a sequência dos eventos que conduzem às consequências, etc.);
- Probabilidade de ocorrência;
- Fontes e/ou causas dos riscos;
- Medidas utilizadas para controlar o risco.

Os riscos podem ser classificados em diferentes categorias (B2.2) e normalmente são listados individualmente como eventos separados, devendo as suas interdependências serem sinalizadas. No registo de riscos, a distinção entre riscos, fontes e controlos deve ser explícita.

Esta ferramenta serve para registar e monitorizar informações sobre os riscos individuais e as medidas utilizadas no seu controlo. Pode ser também utilizada como forma de comunicação de matéria de riscos entre as partes interessadas e destacar os riscos particularmente importantes. É aplicável ao nível de projetos, corporativo, departamental e operacional, podendo por vezes ter caráter obrigatório nalgumas situações.

As entradas do registo de risco são as saídas das técnicas de avaliação de riscos, abordadas nos tópicos B1 a B4, e as saídas são o registo de informações e relatórios sobre riscos. Os pontos fortes desta ferramenta são essencialmente o facto de tornar mais fácil a identificação de ações necessárias e a sua monitorização, uma

vez que a informação sobre os riscos se encontra toda reunida, e conduz a uma maior consciencialização geral dos envolvidos sobre a necessidade de gerir os riscos.

Por outro lado, apresenta limitações como o facto de existirem várias maneiras de descrever um risco, o que leva a que qualquer prioridade que seja definida depende da forma como o risco é descrito, e é também necessário um esforço considerável para manter um registo de riscos atualizado.

Matriz de consequência/probabilidade (B.10.3)

A matriz de consequência/probabilidade é uma ferramenta que permite exibir os riscos de acordo com a sua consequência e probabilidade e combinar essas características para exibir uma classificação da significância do risco.

Inicialmente as escalas para a consequência e probabilidade são definidas para os eixos da matriz. As escalas podem ter qualquer número de pontos, sendo as de três, quatro ou cinco pontos as mais comuns, e podem ser de natureza quantitativa, semiquantitativa ou qualitativa. A escala das consequências pode retratar consequências positivas ou negativas. Ambas as escalas devem estar diretamente ligadas aos objetivos da organização e devem-se estender desde a consequência de maior interesse até à de menor interesse.

Depois de definidas as escalas, é desenhada uma matriz com um eixo correspondente à consequência e outro à probabilidade. Cada célula da matriz contém uma classificação de prioridade, indicada no exemplo seguinte por numeração romana, e normalmente as células são coloridas por forma a representar a magnitude do risco. As regras de decisão, como o nível de atenção da administração ou a urgência de resposta, podem ser vinculadas às células da matriz. O design da matriz deve permitir que a prioridade de um risco seja baseada na extensão em que o risco leva a resultados fora dos limites de desempenho definidos pela organização para os seus objetivos.

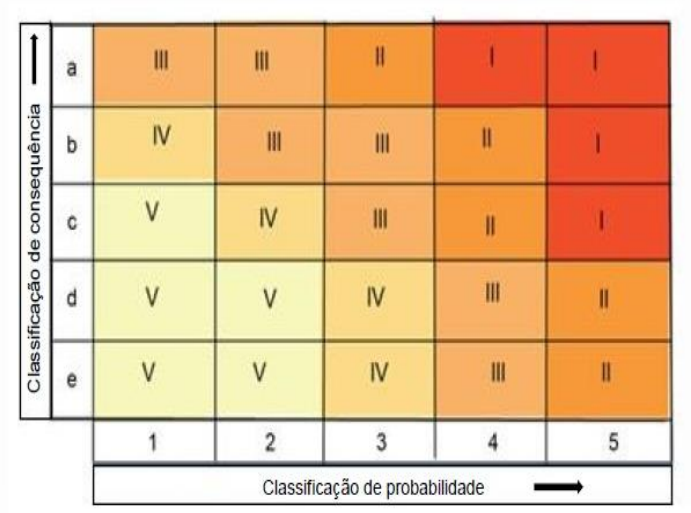


Figura 3.15 - Exemplo de matriz de consequência/probabilidade.
Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019

Este tipo de ferramenta é utilizado para avaliar e comunicar a magnitude relativa dos riscos com base num par de consequência/probabilidade. Riscos com consequências potencialmente altas são os que despertam mais preocupação aos tomadores de decisão, mesmo quando a probabilidade é muito baixa, mas um risco frequente de baixo impacto pode também ter grande consequências cumulativas a longo prazo.

Em suma, a matriz de consequência/probabilidade é relativamente fácil de usar, que fornece uma classificação rápida dos riscos em diferentes níveis de significância, e pode ser utilizada para comparar riscos com diferentes tipos de consequências e tem aplicação a qualquer nível organizacional.

Por outro lado, requer experiência para projetar uma matriz válida, uma vez que pode ser difícil definirem-se as escalas de forma inequívoca aos utilizadores e que se apliquem a uma variedade de circunstâncias relevantes à organização. Também o facto da sua utilização ser subjetiva o que leva a que pessoas diferentes atribuam classificações diferentes ao mesmo risco, uma vez que a classificação depende diretamente da forma como o risco é descrito e do nível de detalhe fornecido, constituem assim algumas das limitações desta ferramenta.

Curva S (B.10.4)

Quando um risco pode ter um intervalo de valores de consequências, é possível representar esse intervalo como uma distribuição de probabilidade de consequências (PDF). No entanto, os dados também podem ser representados com base numa distribuição cumulativa (CDF), dando origem à Curva S. A probabilidade de uma consequência exceder um determinado valor pode ser lida diretamente na Curva S.

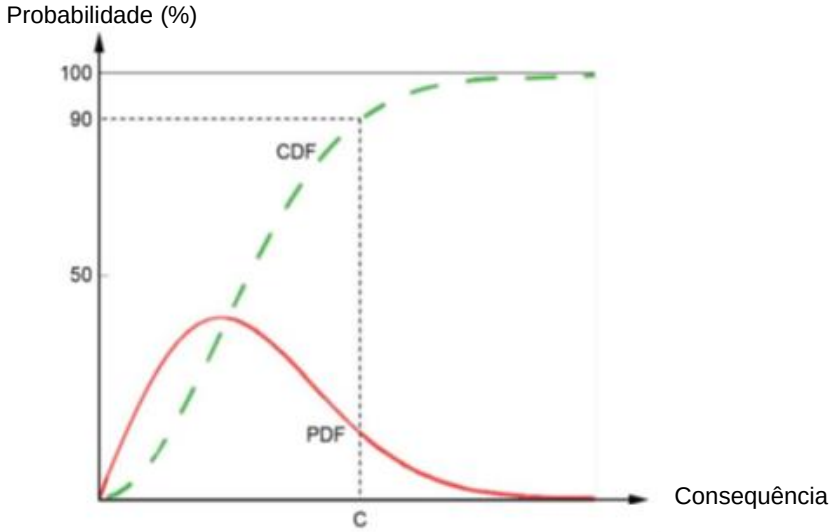


Figura 3.16 - Função de distribuição de probabilidade e função de distribuição cumulativa. Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019

De acordo com o exemplo da Figura 3.16, há uma probabilidade de 90% de que as consequências não excedam o valor C. Através do julgamento e experiência dos especialistas é também possível estimar o ponto inferior, intermédio e superior do intervalo.

Uma função densidade de probabilidade (PDF) fornece a probabilidade de diferentes consequências, qual o valor mais provável, a variabilidade e a extensão em que há a probabilidade de um evento extremo.

A Curva S é uma ferramenta útil que permite discutir valores de consequência C que representam um risco aceitável. É também uma forma de representação de dados que facilita a visualização da probabilidade de as consequências excederem um determinado valor limite definido. Para se contruir uma Curva S é necessário possuir dados ou julgamentos de especialistas a partir dos quais se possam produzir uma distribuição válida. Quantos mais dados estiverem disponíveis maior será a validade da distribuição e melhores serão os dados estatísticos obtidos a partir da curva. O resultado é um diagrama que permite aos decisores considerar a aceitabilidade de um risco e várias estatísticas da distribuição que podem ser comparadas com critérios.

Esta técnica permite representar a magnitude de um risco onde há uma distribuição de consequências e permite aos especialistas fazerem julgamentos dos valores máximos, mínimos e mais prováveis da consequência e produzir uma estimativa da forma razoável da distribuição.

Por outro lado, as distribuições e as estatísticas baseadas na experiência ou dados históricos fornecem pouca informação sobre a probabilidade de eventos futuros com consequências extremas e de baixa probabilidade.

3.5 Aplicabilidade das técnicas ao processo da norma ISO 31000

Após terem sido descritas todas as técnicas aplicáveis ao processo de avaliação de risco, na Tabela 3.5 estão classificadas cada uma das técnicas quanto à sua aplicabilidade na identificação do risco, na análise de consequências e probabilidade, na quantificação do nível de risco e na avaliação do risco.

Uma vez que o presente estudo aborda não só a identificação de modos de falha, mas também as causas e consequências dos possíveis riscos inerentes aos *pipelines* de hidrogénio, de todas as técnicas sumarizadas na Tabela 3.5, a técnica mais aplicável é a FMEA, uma vez que, de acordo com a norma ISO 31010 (ISO, 2019), apresenta uma classificação FA – Fortemente Aplicável ao nível de todas as etapas do processo de avaliação de risco.

Tabela 3.5 - Aplicabilidade das técnicas ao processo da norma ISO 31000. Fonte: Adaptado da norma ISO 31010:2019

Ferramentas e Técnicas	Processo de Avaliação de Risco					Subsecção
	Identificação do Risco	Análise do Risco			Avaliação do Risco	
		Consequência	Probabilidade	Nível de Risco		
ALARP, ALARA e SFAIRP	NA	NA	NA	NA	FA	B.8.2
Análise Bayesiana	NA	NA	FA	NA	NA	B.5.2
Redes Bayesianas	NA	NA	FA	NA	FA	B.5.3
Análise *Bow Tie*	A	FA	A	A	A	B.4.2
Brainstorming	FA	A	NA	NA	NA	B.1.2
Business Impact Analysis (BIA)	A	FA	NA	NA	NA	B.5.4
Mapeamento Causal	A	A	NA	NA	NA	B.6.1
Análise de causa-consequência	A	FA	FA	A	A	B.5.5
Listas de verificação, classificações e taxonomias	FA	NA	NA	NA	NA	B.2.2
Abordagem de *Cindynic*	FA	NA	NA	NA	NA	B.3.2
Matriz de consequência/probabilidade	NA	A	A	FA	A	B.10.3
Análise custo/benefício	NA	FA	NA	NA	FA	B.9.2
Análise de impacto cruzado	NA	NA	FA	NA	NA	B.6.2
Análise de árvore de decisão	NA	FA	FA	A	A	B.9.3
Técnica de Delphi	FA	NA	NA	NA	NA	B.1.3
Event Tree Analysis (ETA)	NA	FA	A	A	A	B.5.6
Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)	FA	FA	NA	NA	NA	B.2.3
Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA)	FA	FA	FA	FA	FA	B.2.3
Fault Tree Analysis (FTA)	A	NA	FA	A	A	B.5.7
Diagramas F-N	A	FA	FA	A	FA	B.8.3
Teoria dos jogos	A	FA	NA	NA	FA	B.9.4

Ferramentas e Técnicas	Processo de Avaliação de Risco					Subsecção
	Identificação do Risco	Análise do Risco			Avaliação do Risco	
		Consequência	Probabilidade	Nível de Risco		
Hazard and Operability Studies (HAZOP)	FA	A	NA	NA	NA	B.2.4
Hazard Analysis and Critical Control Points (HACCP)	FA	FA	NA	NA	FA	B.4.3
Análise de Fiabilidade Humana	FA	FA	FA	FA	A	B.5.8
Ishikawa (espinha de peixe)	FA	A	NA	NA	NA	B.3.3
Layer of Protection Analysis (LOPA)	A	FA	A	A	NA	B.4.4
Análise de Markov	A	A	FA	NA	NA	B.5.9
Simulação de Monte Carlo	NA	A	A	A	FA	B.5.10
Multi-Criteria Analysis (MCA)	A	NA	NA	NA	FA	B.9.5
Técnica de grupo nominal	FA	A	A	NA	NA	B.1.4
Diagrama de Pareto	NA	A	A	A	FA	B.8.4
Privacy Impact Analysis/ Data Privacy Impact Assessment (PIA/DPIA)	A	FA	A	A	FA	B.5.11
Reliability Centred Maintenance (RCM)	A	A	A	A	FA	B.8.5
Índices de Risco	NA	FA	FA	A	FA	B.8.6
Curva S	NA	A	A	FA	FA	B.10.4
Análise de cenários	FA	FA	A	A	A	B.2.5
Entrevistas estruturadas e semi-estruturadas	FA	NA	NA	NA	NA	B.1.5
Structured "What if?" (SWIFT)	FA	FA	A	A	A	B.2.6
Inquéritos	FA	NA	NA	NA	NA	B.1.6
Avaliação de risco toxicológico	FA	FA	FA	FA	FA	B.7.1
Value at Risk (VaR)	NA	A	A	FA	FA	B.7.2
A: aplicável; FA: fortemente aplicável; NA: não aplicável.						

4 Caso prático

4.1 Enquadramento

O caso prático de estudo centra-se na elaboração de uma avaliação de riscos aplicada a *pipelines* de hidrogénio recorrendo à metodologia de análise de modos de falha e seus efeitos (FMEA), com o objetivo de obter uma informação clara de quais os modos de falha que requerem maior atenção para posteriormente se proceder à indicação de ações de melhoria.

Este tema tem vindo a ser objeto de análise, dando origem a alguns estudos publicados recentemente no "*International Journal of Hydrogen Energy*". Viana et al. (2022) elaboraram uma análise de risco multidimensional e categorização de *pipelines* de hidrogénio, com base na Teoria da Utilidade e no método *Electre Tri*. Os autores propuseram uma modelação probabilística para incorporar elementos de análise de risco na avaliação de situações como cenários acidentais, a sua probabilidade de ocorrência e consequências. Os resultados obtidos demonstraram que as medidas para prevenir e mitigar os riscos podem ser aprimoradas tendo em consideração o impacto da dimensão dos riscos humanos, ambientais e financeiros. Este artigo apoio o processo de priorização de recursos para secções de *pipelines*, com o objetivo de minimizar perdas múltiplas.

Hadef et al. (2020) apresentaram uma metodologia para estudar o risco num processo de produção de hidrogénio utilizando as técnicas FAST (*Functional Analysis System Technique*) e HAZOP (*Hazard and Operability Study*). No seu estudo desenvolveram uma matriz de risco para o processo de produção de hidrogénio que atribui a probabilidade de ocorrência de riscos e categorias de gravidade a este processo. A combinação de probabilidade e gravidade resulta em três níveis de risco: baixo, médio e alto. O uso de uma matriz de risco é comumente utilizado para avaliar o risco em processos de hidrogénio (Kikukawa et al., 2009), (Nakayama et al, 2016), (Nakayama et al, 2019). Nakayama et al. (2019) estimaram os riscos de uma estação de abastecimento de hidrogénio explorando diferentes níveis de ameaça, vulnerabilidade e contramedidas de segurança contra os riscos obtidos.

Li et al. (2023) realizaram uma avaliação de risco das falhas em ligações do tipo parafuso-junta-flange em estações de transporte de hidrogénio com base numa FMEA aprimorada. Uma vez que uma FMEA tradicional apresenta uma certa deficiência na determinação dos pesos de fatores de risco, classificação de prioridades de risco dos modos de falha e tratamento de incertezas durante o processo de avaliação de risco, o artigo publicado por estes autores propõe uma utilização de uma FMEA integrando o processo de hierarquia analítica (AHP), a técnica de preferência de ordem por similaridade a uma solução ideal (TOPSIS) e o modelo de nuvem (CM). A combinação de todas estas ferramentas, foi utilizada num estudo de caso de um sistema de ligação do tipo parafuso-junta-flange numa estação de transporte de hidrogénio no norte da China, para verificar a adaptabilidade do método proposto. Em comparação com a FMEA tradicional, as classificações de decisões obtidas com este método foram mais discriminatórias e distinguiram o risco de cada modo de falha, fornecendo informações mais preciosas aos tomadores de decisão.

Zhang & Tian (2022) elaboraram uma análise de falhas em *pipelines* de alta resistência corroídos sujeitos a danos causados por hidrogénio com base na rede neuronal GA-BP e no método de elementos finitos (FEM). Pela utilização do FEM, os resultados obtidos demonstram que os danos causados pelo hidrogénio podem alterar os comportamentos de falha do *pipeline* corroído e reduzir a tensão residual. De seguida, com base nos resultados de uma simulação e na análise de uma regressão, desenvolveram um novo modelo de rotura para considerar os danos causados pelo hidrogénio e melhorar a precisão da estimativa. Em terceiro lugar, com base no algoritmo genético (GA), estabeleceram uma rede neuronal GA-BP para uma estimativa precisa e eficiente da tensão residual considerando os danos causados pelo hidrogénio. Por fim, realizaram um teste ortogonal para investigar os efeitos de parâmetros críticos na pressão de rotura do *pipeline* corroído após os danos causados pelo hidrogénio. Os resultados indicam que os danos causados pelo hidrogénio e o comprimento da corrosão têm contribuições semelhantes para a tensão residual. Finalmente, os resultados da simulação de *pipelines* com múltiplas corrosões mostram que os danos causados pelo hidrogênio têm um impacto significativo no efeito de interação entre as corrosões adjacentes.

Xu et al. (2017) realizaram um estudo que permite identificar as lacunas existentes numa avaliação de risco quantitativa aplicada a *pipelines* de transporte de hidrogénio e quais as formas de abordar a mesma. A maioria dos modelos existentes para *pipelines* em geral não pode ser aplicada diretamente a *pipelines* de hidrogénio, no entanto, podem servir como base para futuros modelos de QRA de *pipelines* de hidrogénio. Os resultados obtidos fornecem noções de pesquisa necessárias para que uma QRA seja aplicável a *pipelines* de hidrogénio.

4.2 Desenvolvimento e aplicação da FMEA

4.2.1 Diagrama de blocos

Com o intuito de organizar a informação relativa ao objeto de estudo, procedeu-se à divisão do sistema em blocos funcionais para tornar mais clara a identificação das funções de cada componente ou subsistema. Assim, é feita uma análise às funções de cada componente ou subsistema do bloco, de forma individual, caracterizando os modos de falha mais críticos e que merecem maior relevância na análise.

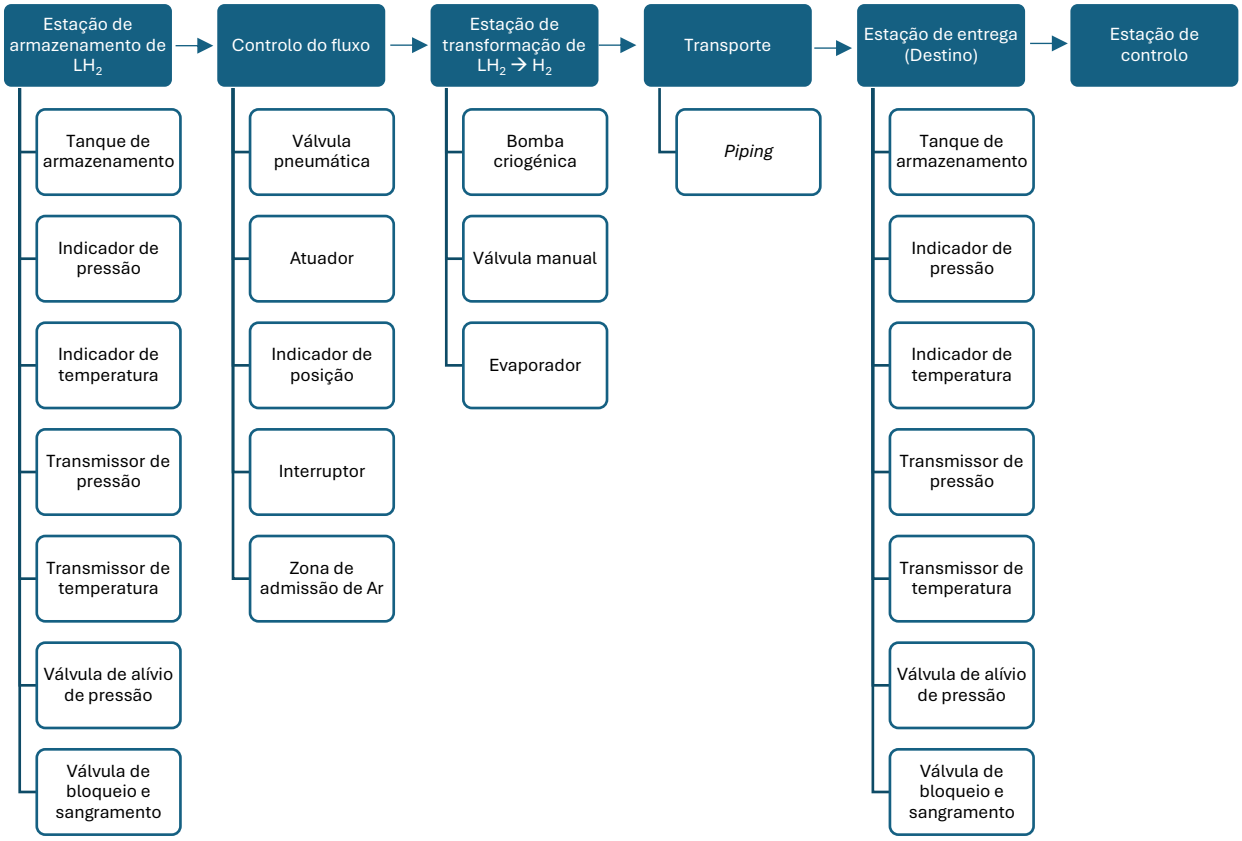


Figura 4.1 - Diagrama de blocos funcionais

Na Tabela 4.1 é apresentada a descrição funcional de cada sistema:

Tabela 4.1 - Descrição funcional dos sistemas constituintes dos *pipelines* de hidrogénio.

Nome do Sistema	Descrição funcional
Estação de armazenamento de LH_2	Armazenamento de hidrogénio líquido a níveis de pressão controlada.
Controlo do fluxo	Transporte controlado de hidrogénio líquido desde o armazenamento até aos componentes do processo.
Estação de transformação de $LH_2 \rightarrow H_2$	Transformação de hidrogénio líquido em hidrogénio gasoso, a pressão e temperaturas controladas.
Transporte	Transporte físico do hidrogénio desde o armazenamento até aos componentes e sistemas do processo.
Estação de entrega (Destino)	Estação de entrega do produto gasoso ao cliente final.
Estação de controlo	Monitorização e controlo do funcionamento dos sistemas e subsistemas, bem como dos vários parâmetros de operação.

A Tabela 4.2 apresenta a descrição funcional dos principais componentes que constituem os sistemas representados no diagrama de blocos da Figura 4.1.

Tabela 4.2 - Descrição funcional dos principais componentes.

Designação	Descrição Funcional
Tanque de armazenamento de líquido	Armazenamento de hidrogénio líquido.
Indicador de pressão	Indica a pressão no interior do tanque.
Transmissor de pressão	Transmite a leitura do sensor de pressão ao sistema de controlo.
Válvula de alívio de pressão	Alívio controlado de hidrogénio gasoso para controlo de pressão.
Válvula de bloqueio e sangramento esférica	Bloqueia o fluxo e purga o hidrogénio gasoso restante.
Válvula pneumática	Controla o fluxo de hidrogénio. Válvula com fluxo fechado com retorno por mola.
Atuador	Controla a operação da válvula pneumática (FV).
Indicador de posição	Indica a posição da válvula pneumática (FV).
Interruptor aberto	Indica a posição aberta da válvula pneumática (FV).
Interruptor fechado	Indica a posição fechada da válvula pneumática (FV).
Ar	Abastecimento de ar.
Bomba criogénica	Transporte de hidrogénio líquido.
Válvula manual	Isola o fluxo para o sistema a jusante.
Evaporador	Transformação de fase líquida para gasosa.
Tubagem	Transporte de hidrogénio líquido e gasoso.

4.2.2 Elaboração das tabelas de ocorrência, detetabilidade, severidade e grau de risco

Uma das dificuldades iniciais na elaboração de uma FMEA é a identificação dos potencias modos de falha, as suas causas e consequências. Simultaneamente surge a dificuldade de como pontuar cada um desses critérios para o apuramento do grau de risco. Para tal, neste caso de estudo, para a classificação do critério do índice de severidade, recorreu-se à utilização da norma MIL-STD-882C (Department of Defense, 1993) com as devidas adaptações por forma a ser aplicável a este estudo.

Tabela 4.3 - Índice de severidade aplicado ao caso de estudo.

Severidade	Severidade	Índice de severidade (S)
Desprezável	Nenhum dano ou dano não mensurável.	1
Marginal	Danos irrelevantes ao meio ambiente e à comunidade externa.	2
Crítico	Possíveis danos ao meio ambiente devidos a liberações de substâncias químicas, tóxicas ou inflamáveis, alcançando áreas externas à instalação. Pode provocar lesões de gravidade moderada na população externa ou impactos ambientais com reduzido tempo de recuperação.	3
Catastrófico	Impactos ambientais devidos a liberações de substâncias químicas, tóxicas ou inflamáveis, alcançando áreas externas à instalação. Provoca mortes ou lesões graves na população externa ou impactos ao meio ambiente com tempo de recuperação elevado.	4

No caso de classificação da probabilidade de falha e do índice de deteção dos modos de falha, e tendo por base o Manual de Referência FMEA (Moura, 2000), construiu-se a Tabela 4.4 e 4.5. Para atribuição do índice de deteção dos modos de falha do objeto de estudo, foi considerado que a detetabilidade é vista como a capacidade de detetar o modo de falha logo após a sua ocorrência.

Tabela 4.4 - Índice de ocorrência aplicado ao caso de estudo.

Probabilidade de falha	Taxa de ocorrência em horas	Índice de ocorrência (O)
Muito alta: A falha é quase inevitável	≤ 1 em 720 (1 mês em funcionamento)	5
Alta: Falha frequente	1 em 2160 (3 meses em funcionamento)	4
Moderada: Falha ocasional	1 em 4320 (6 meses em funcionamento)	3
Baixa: Poucas falhas	1 em 8640 (1 ano em funcionamento)	2
Muito baixa: Falha isolada	1 em 17280 (2 anos em funcionamento)	1

Tabela 4.5 - Índice de detetabilidade aplicado ao caso de estudo.

Detetabilidade	Critério (probabilidade de detetar o modo de falha)	Índice de deteção (D)
Muito baixa	As medidas de controlo têm uma probabilidade muito baixa de detetar a existência da falha	5
Baixa	As medidas de controlo têm uma probabilidade baixa de detetar a existência da falha	4
Moderada	As medidas de controlo têm uma probabilidade moderada de detetar a existência da falha	3
Alta	As medidas de controlo têm uma probabilidade alta de detetar a existência da falha	2
Muito alta	As medidas de controlo têm uma probabilidade muito alta de detetar a existência da falha	1

Por fim, surge a classificação do grau de risco representada em baixo na Tabela 4.6, com o objetivo de apurar o RPN (*Risk Priority Number*) de modo a obter uma informação de quais os modos de falha que requerem maior atenção e que consequentemente necessitem de realização de ações de melhoria de forma a mitigar o risco associado a cada uma das falhas.

Tabela 4.6 - Classificação do grau de risco aplicado ao caso de estudo (RPN).

***Risk Priority Number* (RPN)**		**Grau de urgência das medidas**
RPN ≥ 64 **	Risco Elevado	Requer ação imediata para diminuir o risco (atuando em "O", "S" ou "D")
18 ≤ RPN <64	Risco Moderado	Devem ser tomadas ações logo que possível para diminuir o risco
RPN <18 *	Risco Baixo	Devem ser tomadas medidas de melhoria sem carácter de urgência

* Considerou-se o limite superior para Risco Baixo o RPN resultante do produto entre: 3 (Ocorrência: Moderada) x 2 (Severidade: Marginal) x 3 (Detetabilidade: Moderada) = 18

** Considerou-se o limite inferior para Risco Elevado o RPN resultante do produto entre: 4 (Ocorrência: Alta) x 4(Severidade: Crítico) x 4 (Detetabilidade: Baixa) = 64

4.2.3 Aplicação da FMEA a *pipelines* de hidrogénio e sistemas interligados

Como já foi referido anteriormente uma das grandes dificuldades na elaboração da FMEA deste trabalho, consistiu na identificação dos modos falha potenciais dos vários sistemas que compõem os *pipelines*, bem como as suas respetivas causas e efeitos.

De seguida é apresentada a tabela FMEA que teve como base outras análises de risco já elaboradas a gasodutos, realizadas por (Correa-Jullian & Groth, n.d.) e (Milioulis et al., 2021), contemplando também outros modos de falha identificados que resultaram de um trabalho de *brainstorming* e pesquisa efetuado entre o pesquisador e o orientador desta dissertação.

Tabela 4.7 - FMEA aplicada a *pipelines* de hidrogénio e sistemas interligados

Aplicação da FMEA a *pipelines* de hidrogénio e sistemas interligados										
Sistema	**Componente**	**Modo de falha**	**Causas**	**Efeitos**	**Ocorrência**	**Severidade**	**Detetabilidade**	**RPN**	**Grau de Risco**	**Ações recomendadas.**
Estação de armazenamento de LH2	Tanque de armazenamento	Rotura do tanque.	Acidente ou colisão. Vandalismo. Corrosão. Erros de fabrico.	Perda de produto inflamável. Possibilidade de incêndio se houver ignição.	2	4	2	16	Baixo	Reparação ou substituição imediata.
		Falha da parede externa do tanque.	Incêndio. Vandalismo. Corrosão. Erros de fabrico.	Perda de produto inflamável. Intensificação do incêndio.	2	4	2	16	Baixo	Reparação ou substituição imediata.
		Sobrepressão.	Entrada de calor no interior do tanque.	Elevada taxa de evaporação do gás.	2	4	4	32	Moderado	Verificação do funcionamento do sensor e transmissor de pressão.
	Sensor de temperatura	Sem sinal de saída.	Corte na cablagem elétrica. Componente defeituoso. Curto-circuito. Redução da resistividade do condutor.	Imprecisão na medição do valor de temperatura.	4	2	2	16	Baixo	Reparação, calibração ou substituição.
	Sensor de pressão	Sem sinal de saída.	Corte na cablagem elétrica. Componente defeituoso. Curto-circuito. Redução da resistividade do condutor.	Imprecisão na medição do valor de pressão.	4	2	2	16	Baixo	Reparação, calibração ou substituição.
	Transmissor de pressão	Sem sinal de saída.	Corte na cablagem elétrica. Componente defeituoso. Curto-circuito. Redução da resistividade do condutor.	O sensor fornece uma leitura errada, fora da faixa de trabalho. Perda de controlo das condições de operação no interior do tanque.	4	2	2	16	Baixo	Reparação, calibração ou substituição.
	Transmissor de temperatura	Sem sinal de saída.	Corte na cablagem elétrica. Componente defeituoso. Curto-circuito. Redução da resistividade do condutor.	O sensor fornece uma leitura errada, fora da faixa de trabalho. Perda de controlo das condições de operação no interior do tanque.	4	2	2	16	Baixo	Reparação, calibração ou substituição.

Aplicação da FMEA a *pipelines* de hidrogénio e sistemas interligados										
Sistema	**Componente**	**Modo de falha**	**Causas**	**Efeitos**	**Ocorrência**	**Severidade**	**Detetabilidade**	**RPN**	**Grau de Risco**	**Ações recomendadas.**
	Válvula de alívio de pressão	Bloqueio da válvula.	Temperaturas criogénicas. Vandalismo. Corrosão. Erros de fabrico.	Formação de gelo no seu interior. Sobrepressão do sistema.	4	4	4	64	Elevado	Ajustar as condições de operação do gás à entrada da válvula.
		Falha mecânica da mola.	Corrosão. Erros de fabrico.	Enfraquecimento da força da mola. Fratura da mola.	3	3	2	18	Moderado	Reparação ou substituição imediata.
	Válvula de bloqueio e sangramento	Bloqueio da válvula.	Vandalismo. Corrosão. Erros de fabrico.	Perda de produto inflamável. Possibilidade de incêndio se houver ignição.	4	4	2	32	Moderado	Reparação ou substituição imediata.
Controlo de fluxo	Válvula pneumática	Falha na operação.	Fuga na tubagem de ar. Vandalismo. Erros de fabrico.	Paralisação do transporte do hidrogénio até à bomba criogénica.	4	3	2	24	Moderado	Reparação ou substituição da tubagem de alimentação de ar.
		Abertura e fecho em tempos não definidos.	Avaria elétrica de um relé.	Paralisação do transporte do hidrogénio até à bomba criogénica.	5	2	3	30	Moderado	Substituição imediata.
	Atuador	Paragem de movimento.	Contaminação do ar comprimido. Erros de fabrico. Corrosão.	Interrupção do funcionamento.	2	2	1	4	Baixo	Substituição do filtro de ar comprimido.
	Indicador de posição.	Sem sinal de saída.	Corte na cablagem elétrica. Componente defeituoso. Curto-circuito. Redução da resistividade do condutor.	Interrupção do funcionamento.	2	2	1	4	Baixo	Reparação, calibração ou substituição.
Estação de transformação LH2 - H2	Bomba criogénica	Fuga na bomba.	Vedação deficiente ou falha na instalação. Erros de fabrico.	Perda de produto inflamável. Possibilidade de incêndio se houver ignição.	5	3	5	75	Elevado	Verificação das falanges e colocação de novos vedantes.
		Funcionamento prematuro da bomba.	Falha no controlador.	Perda de produto inflamável. Possibilidade de incêndio se houver ignição.	4	4	4	64	Moderado	Reparação, calibração ou substituição.
		Paragem de funcionamento.	Danos causados por corrosão.	Diminuição da durabilidade do equipamento.	5	2	3	30	Moderado	Reparação ou substituição.
		Desgaste superficial com alteração de geometria.	Danos causados pela capacidade abrasiva do gás e /ou por cavitação.	Diminuição da durabilidade do equipamento.	5	2	3	30	Moderado	Reparação ou substituição.

Aplicação da FMEA a *pipelines* de hidrogénio e sistemas interligados										
Sistema	**Componente**	**Modo de falha**	**Causas**	**Efeitos**	**Ocorrência**	**Severidade**	**Detetabilidade**	**RPN**	**Grau de Risco**	**Ações recomendadas.**
	Evaporador	Fuga nos acessórios e uniões da tubagem.	Vedação deficiente ou falha na instalação.	Perda de produto inflamável. Possibilidade de incêndio se houver ignição.	5	3	5	75	Elevado	Verificação das falanges e colocação de novos vedantes.
		Rotura.	Acidente ou colisão. Vandalismo. Erros de fabrico.	Perda de produto inflamável. Possibilidade de incêndio se houver ignição.	5	3	5	75	Elevado	Reparação ou substituição imediata.
		Baixa temperatura e pressão do gás.	Flutuações de temperatura.	Formação de gelo no seu interior.	2	2	3	12	Baixo	Ajustar as condições de operação do gás à entrada do evaporador.
Transporte	Tubagem	Fuga.	Cruzamento com estrada não pavimentada. Atividade de terceiros causando roturas ou furos na tubagem, devido a escavação ou vandalismo. Comprometimento mecânico do duto devido a movimentação de cargas pesadas.	Perda de produto inflamável. Possibilidade de incêndio se houver ignição.	4	3	4	48	Moderado	Seguir procedimentos de inspeção e manutenção preventiva para as válvulas e acessórios. Sinalizar o local e implementar um plano de ação de emergência.
	Válvula de bloqueio intermédia	Bloqueio da válvula.	Vandalismo. Corrosão. Erros de fabrico.	Perda de produto inflamável. Possibilidade de incêndio se houver ignição.	2	3	4	24	Moderado	Reparação ou substituição.
	Pigs	Fuga no lançador de *pigs* para operações de inspeção.	Alinhamento indevido. Vedação deficiente em juntas, válvulas, conexões, acessórios, etc.	Perda de produto inflamável. Possibilidade de incêndio se houver ignição.	3	3	3	27	Moderado	Implementar um plano de inspeção e manutenção de equipamentos, tubagem e acessórios.
		Fuga no recetor de *pigs* para operações de inspeção.	Alinhamento indevido. Vedação deficiente em juntas, válvulas, conexões, acessórios, etc.	Perda de produto inflamável. Possibilidade de incêndio se houver ignição.	3	3	3	27	Moderado	
Estação de controlo	Sistema	Erro humano.	Falta de formação. Distração.	Perda de produto inflamável. Possibilidade de incêndio se houver ignição.	2	4	1	8	Baixo	Ações de formação e sensibilização.
		Falha de energia elétrica.	Curto-circuito. Falha no abastecimento de energia.	Perda do controlo do processo.	4	2	1	8	Baixo	Implementar um plano de inspeção e manutenção.

4.2.4 Análise de resultados

Realizada a análise dos modos de falha e seus efeitos aplicada aos *pipelines* de hidrogénio, de seguida procedeu-se à análise e interpretação dos resultados obtidos.

Após análise da Tabela 4.7, foi possível sintetizar os resultados obtidos na Tabela 4.8, indicando as frequências relativas aos graus de risco obtidos. Verifica-se que dos 27 modos de falha identificados (referentes a distintas causas associadas), 4 apresentam um grau de risco elevado, 12 apresentam um grau de risco moderado e 11 apresentam um grau de risco baixo.

Tabela 4.8 - Nº de modos de falha identificados por grau de risco.

Grau de risco	Modos de falha identificados
Elevado	4
Moderado	12
Baixo	11
Total	27

A partir do gráfico da Figura 4.2, é possível observar as percentagens de incidência segundo o grau de risco, com o grau de risco elevado a totalizar 14,8% dos modos de falha identificados, o grau de risco moderado representa 44,4% e o grau de risco baixo representa 40,7%.

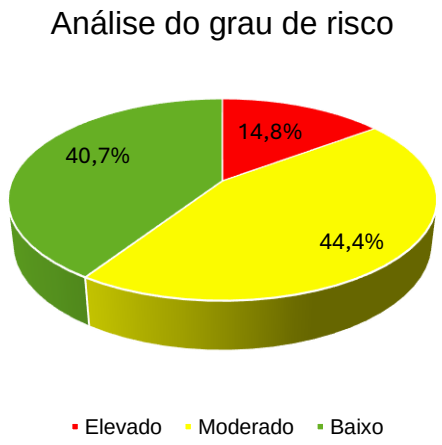


Figura 4.2 - Gráfico de análise do grau de risco.

Pela interpretação do gráfico da Figura 4.2 juntamente com a Tabela 4.8, conclui-se que 14,8% da totalidade dos modos de falha identificados (risco elevado) irão necessitar de uma ação imediata para diminuir o seu grau de risco. Na Tabela 4.7 estão também identificadas algumas ações recomendadas para cada modo de falha que podem ser adotadas para reduzir o grau de risco. Os restantes 85,1% têm um grau de urgência consideravelmente menor pelo que não obrigam a uma intervenção imediata para implementar as ações de melhoria.

4.3 Maiores riscos do transporte de hidrogénio em *pipelines* existentes

No que se refere aos *pipelines* propriamente ditos, e quando a situação diz respeito ao aproveitamento de gasodutos de gás natural já existentes para a injeção de hidrogénio, existem riscos muito específicos. Grande parte dos modos de falha identificados na Tabela 4.7, como fugas, sobrepressão, roturas, flutuações de temperatura e pressão, entre outros, estão diretamente relacionados com as propriedades químicas do hidrogénio e a sua ocorrência resulta de riscos muito específicos.

Os parágrafos seguintes abordam em detalhe os vários riscos inerentes a estes sistemas, assim como a classificação desses riscos na Tabela 4.9, tendo por base as tabelas de probabilidade de ocorrência, de severidade e de detetabilidade usadas na análise FMEA anteriormente realizada.

Fragilização por hidrogénio

A fragilização por hidrogénio é um fenómeno em que átomos de hidrogénio penetram no metal do gasoduto, especialmente em altas pressões. As moléculas de hidrogénio difundem-se no material do *pipeline* e com o tempo, o hidrogénio faz com que o metal se torne frágil e propenso a fendas e falhas repentinas especialmente em zonas sujeitas a maiores tensões (juntas, soldadura, curvas, etc.), reduzindo a vida útil do *pipeline*.

Para reduzir os efeitos de fragilização por hidrogénio devem utilizar-se materiais mais resistentes, como aços inoxidáveis, realizar inspeções regulares e limitar a concentração de hidrogénio na mistura gasosa de forma a minimizar o impacto.

Shehata & El-Shamy (2023) elaboraram uma revisão das falhas em oleodutos e gasodutos causadas pelo hidrogénio. O estudo realizado pretende examinar a solubilidade e infiltração do hidrogénio nos aços de *pipelines*. As fendas induzidas pelo hidrogénio (HIC) e a fragilização por hidrogénio (HE) são dois fenómenos de falha muito comuns neste tipo de infraestrutura e que podem causar consequências catastróficas. As fendas induzidas pelo hidrogénio têm início pela absorção do hidrogénio no material do *pipeline*, que leva à formação de gás em descontinuidades como fendas, defeitos ou soldaduras. Por outro lado, o fenómeno de fragilização por hidrogénio é causado pelo hidrogénio que entra na estrutura metálica levando à degradação das propriedades mecânicas como a ductilidade e tenacidade. A suscetibilidade ao HIC e HE depende de fatores como composição do material, microestrutura, condição da superfície e concentração de hidrogénio. Os resultados experimentais revelaram que o HIC foi causado principalmente pela acumulação de hidrogénio em concentrações de tensão localizadas, enquanto o HE foi atribuído à difusão de hidrogénio na estrutura. O estudo

recomenda que sejam tomadas medidas preventivas para mitigar os riscos causados por estes dois fenómenos, apresentando algumas medidas como a seleção de materiais com alta resistência ao HIC e HE, a implementação de técnicas de soldadura adequadas e uma boa preparação da superfície, para além da monitorização da concentração de hidrogénio no interior dos *pipelines*.

Fugas

O hidrogénio é a menor e mais leve molécula, o que o torna mais propenso a fugas comparativamente ao gás natural. Para além de poder escapar através de pequenas aberturas, juntas, pontos de conexão e fendas em tubagens, reduzindo a eficiência do transporte, aumenta o risco de concentração de hidrogénio inflamável em áreas confinadas comprometendo a segurança do meio envolvente.

Torna-se necessária a existência de sistemas regulares de deteção e monitorização de fugas, melhorias de vedação e substituição de componentes mais antigos ou com elevado desgaste que são suscetíveis a fugas de hidrogénio.

Compatibilidade de materiais

Muitos materiais usados em tubagens de gás natural, como alguns metais, elastómeros (juntas de borracha) e plásticos, podem não ser compatíveis com o hidrogénio. O hidrogénio pode degradar ou reagir com alguns desses materiais, levando a falhas, levando a um aumento dos custos de manutenção devido à substituição frequente de materiais incompatíveis.

Para reduzir este risco devem utilizar-se materiais compatíveis com o hidrogénio, como polímeros ou revestimentos projetados especificamente para suportar os efeitos do hidrogénio.

Sobrepressão e variabilidade de pressão

O hidrogénio tem uma densidade de energia menor do que o gás natural. Para manter a quantidade de energia transportada, implica que se transporte maior volume de hidrogénio, potencialmente exigindo diferentes sistemas de controlo de pressão, como válvulas de fecho automático e sistemas de alívio de pressão para evitar a fenómenos de sobrepressão que podem levar à rotura do *pipeline*.

Chen et al. (2020) elaboraram uma análise de falha de pressão de gasodutos de armazenamento de hidrogénio sob baixa temperatura e alta pressão. As propriedades do material dos tubos em baixa temperatura são diferentes das propriedades a temperatura ambiente. Se o meio no tubo for corrosivo, isso fará com que a espessura da parede do tubo diminua. Neste artigo, foi elaborada uma nova equação de pressão de falha do gasoduto de aço macio com defeitos de corrosão em temperatura

extremamente baixa. Numa primeira fase definiram um modelo mecânico do gasoduto com defeitos causados por corrosão e, posteriormente, obtiveram uma solução analítica do modelo mecânico com base na teoria elástica. De seguida desenvolveram uma equação de pressão de falha do gasoduto de armazenamento de hidrogénio corroído em temperatura extremamente baixa, e compararam a precisão da equação de pressão de falha com o método de elementos finitos (FEM). Os resultados indicam que o valor calculado pela equação de pressão de falha é consistente com o do FEM. Este artigo fornece assim uma base teórica para a avaliação de segurança de gasodutos de armazenamento de hidrogénio de baixa temperatura. A nova equação apresentada neste artigo pode fornecer orientação útil para o projeto de gasodutos de baixa temperatura e alta pressão.

Problemas de mistura de hidrogénio

A mistura de hidrogénio com gás natural pode causar uma distribuição desigual no interior dos *pipelines*, e o menor poder calorífico do hidrogénio (por volume) significa que os consumidores a jusante podem receber conteúdo de energia variável, reduzindo assim a sua eficiência energética. Para além do mais, proporções de mistura inconsistentes podem levar a problemas operacionais nos equipamentos e aparelhos a jusante projetados para gás natural.

Os sistemas de mistura devem garantir uma mistura consistente e uniforme de hidrogénio e gás natural, juntamente com ajustes em equipamentos que podem operar com uma mistura variável.

Kim et al. (2024) realizaram uma avaliação de risco quantitativa à mistura de hidrogénio no interior de *pipelines* de gás natural. Para tal, utilizaram seis concentrações de mistura de hidrogénio diferentes, três tubos e quatro furos de libertação. No caso do incêndio, a distância do efeito diminuiu com o aumento da concentração de hidrogénio. Para o caso de explosões de nuvem de vapor, a distância a favor do vento da sobrepressão máxima da explosão aumentou com o aumento da concentração de hidrogénio. É esperado que este estudo contribua para a implementação de medidas de segurança em indústrias com misturas de hidrogénio em *pipelines* de gás natural.

Chen et al. (2022) elaboraram uma avaliação da integridade estrutural de *pipelines* de gás natural misturado com hidrogénio, sob condições de carga extrema, com base num novo critério de falha multiparâmetro. Numa primeira fase estabeleceram um modelo mecânico do gasoduto. De seguida definiram um critério de falha multiparâmetro que combina a razão de escoamento com a resistência à tração. Posteriormente apresentaram uma equação de pressão de rotura de gasodutos de gás natural misturados com hidrogénio, com base no critério de falha multiparâmetro, terminando com a realização de experiências e métodos de elementos finitos para verificar a precisão da equação. Os resultados demonstraram que o critério de falha

multiparâmetro pode ser utilizado para prever com precisão a pressão de rotura de gasodutos de gás natural misturado com hidrogénio.

Ignição e inflamabilidade

O hidrogénio tem uma ampla faixa de inflamabilidade (4% a 75% no ar) e uma baixa energia de ignição em comparação com o gás natural. Isso torna o hidrogénio mais propenso a inflamar sob certas condições, especialmente em caso de fuga.

Para reduzir este risco devem adaptar-se os protocolos de segurança existentes e implementar sistemas de deteção de fuga específicos para hidrogénio, garantindo uma ventilação adequada em espaços confinados e o cumprimento de normas de segurança do hidrogénio.

Liu et al. (2024) realizaram um estudo sobre o progresso de uma ignição espontânea de hidrogénio durante uma fuga a elevada pressão. Descobertas experimentais indicam que o hidrogénio pressurizado é propenso à combustão espontânea, mesmo abaixo dos valores de pressão no interior de *pipelines* permitidos na maioria dos países (2 MPa). Este estudo teve como objetivo analisar e comparar os mecanismos de ignição espontânea, analisar o progresso no estudo da ignição espontânea de hidrogénio em fugas de alta pressão com base na teoria da ignição por difusão e comparar e discutir estatisticamente as influências de fatores significativos existentes em *pipelines* (por exemplo a estrutura interna) e/ou falhas na tubagem (por exemplo, fatores de rutura) na ignição espontânea.

Problemas de medição do caudal

O hidrogénio difere significativamente do gás natural devido à sua menor densidade e viscosidade. Os caudalímetros existentes podem não medir com precisão a quantidade de hidrogénio existente na mistura gasosa, levando a erros de faturação ao consumidor, utilização ineficiente do hidrogénio e preocupações relacionadas com a segurança devido a variações de pressão não detetadas.

Para reduzir este risco é importante que os caudalímetros estejam projetados especificamente para misturas gasosas de hidrogénio e gás natural.

Danos de terceiros e riscos de escavação

Os *pipelines* normalmente correm risco de danos causados por terceiros devido a atividades de construção ou trabalho de escavação. O risco aumentado de fuga de hidrogénio amplifica os perigos em caso de danos acidentais, como incêndio ou explosão, para além de poder causar interrupções no fornecimento e danos no meio ambiente.

É possível reduzir este risco realizando campanhas de consciencialização pública, uso de marcadores de *pipelines* e tecnologias avançadas de prevenção de danos (por exemplo, vigilância, mapeamento geográfico).

Ruiz-Tagle & Groth (2024) realizaram um estudo comparativo dos riscos de escavação por terceiros entre *pipelines* de hidrogénio e de gás natural. Os *pipelines* de gás natural facilitam o transporte e armazenamento de hidrogénio a baixos custos e a uma larga escala, no entanto o hidrogénio apresenta alguns desafios de segurança, como maior probabilidade de ignição, comportamento diferente da chama e maior potencial de fragilização por hidrogénio. Este estudo apresenta o modelo SHyTERP (*Safe Hydrogen Transportation and Excavation Risk Prevention for Pipelines*) – Transporte Seguro de Hidrogénio e Prevenção de Riscos de Escavação para Gasodutos. O modelo incorpora modelos causais, estatísticas de danos de escavação e falhas de *pipelines*, e modelos físicos validados da libertação do hidrogénio e gás natural bem como do comportamento da chama. Por meio de quatro estudos de caso, o modelo compara os riscos de danos de escavação por terceiros de *pipelines* de hidrogénio e gás natural, e fornece noções e recomendações para uma introdução segura de hidrogénio em gasodutos existentes.

Incompatibilidade do sistema para consumidores finais

Muitos equipamentos do consumidor final, queimadores industriais e motores são projetados para gás natural. Pequenas alterações na concentração de hidrogénio podem afetar o desempenho, levando a uma redução da vida útil dos equipamentos, ou causar problemas de segurança como a formação de monóxido de carbono devido a uma combustão incompleta.

Torna-se necessário modificar ou substituir os equipamentos para que sejam compatíveis com misturas de hidrogénio e gás natural, juntamente com ajustes nas configurações do queimador.

Dificuldade na separação do hidrogénio em pontos de utilização final

Em aplicações onde hidrogénio puro é necessário, separar hidrogénio de misturas de gás natural pode ser tecnicamente desafiante e dispendioso. Para tal, é necessária a utilização de tecnologias avançadas de separação, como membranas ou adsorção por oscilação de pressão, para garantir a pureza do hidrogénio quando necessário.

De seguida é apresentada uma FMEA, na Tabela 4.9, onde são classificados os riscos acima identificados relativamente à injeção de hidrogénio em *pipelines* existentes de gás natural, quanto à sua probabilidade de ocorrência, grau de severidade e índice de detetabilidade.

Tabela 4.9 - Aplicação da FMEA à injeção de hidrogénio em *pipelines* existentes de gás natural

Aplicação da FMEA à injeção de hidrogénio em *pipelines* existentes de gás natural								
Modo de falha	**Causas**	**Efeitos**	**Ocorrência**	**Severidade**	**Detetabilidade**	**RPN**	**Grau de Risco**	**Ações recomendadas.**
Fragilização por hidrogénio.	Sobrepressão de hidrogénio.	Degradação do material da tubagem. Aparecimento de fissuras. Falha do *pipeline.*	3	4	3	36	Moderado	Escolha correta dos materiais (ligas resistentes à fragilização). Realização de inspeções regulares.
Fugas.	Fadiga dos materiais ou aparecimento de fissuras (Fragilização por hidrogénio).	Libertação de hidrogénio. Potencial explosão. Risco de incêndio.	3	4	3	36	Moderado	Escolha correta dos materiais (ligas resistentes à fragilização). Realização de inspeções regulares.
Degradação do material (fendas em juntas e outros componentes não metálicos).	Incompatibilidade de materiais.	Falha do *pipeline* devido à degradação de componentes não metálicos. Aumento dos custos de manutenção devido à substituição frequente de materiais incompatíveis.	3	3	2	18	Moderado	Alteração para materiais compatíveis com o hidrogénio (ex: polímeros e revestimentos adequados).
Sobrepressão e variabilidade de pressão.	Mau funcionamento do regulador de pressão ou do compressor.	Rotura do *pipeline*. Libertação de hidrogénio.	2	3	2	12	Baixo	Instalar válvulas de alívio de pressão. Monitorização continua dos níveis de pressão.
Falhas operacionais de equipamentos.	Proporções de mistura de hidrogénio com gás natural inconsistentes.	Perda de eficiência energética para os consumidores finais.	4	2	3	24	Moderado	Garantir uma mistura consistente e uniforme. Realizar os ajustes necessários nos equipamentos.
Incêndio / explosão.	Ignição acidental de hidrogénio libertado.	Danos graves causados ao equipamento. Ferimentos. Morte.	1	4	3	12	Baixo	Garantir uma ventilação adequada. Instalar detetores de incêndio. Aplicar protocolos de segurança rigorosos.
Problemas de medição do caudal.	Utilização de caudalímetros não projetados para a mistura de hidrogénio com gás natural.	Medição imprecisa. Erros de faturação ao consumidor. Utilização ineficiente do hidrogénio. Variações de pressão não detetadas.	3	2	2	12	Baixo	Alteração para caudalímetros projetados para misturas de hidrogénio com gás natural.

Aplicação da FMEA à injeção de hidrogénio em *pipelines* existentes de gás natural								
Modo de falha	**Causas**	**Efeitos**	**Ocorrência**	**Severidade**	**Detetabilidade**	**RPN**	**Grau de Risco**	**Ações recomendadas.**
Danos de terceiros e riscos de escavação.	Danos acidentais causados por escavações ou atividades de construção.	Rotura repentina. Grande libertação de hidrogénio.	1	4	3	12	Baixo	Colocação de marcadores de *pipelines* no terreno. Emitir avisos de escavação. Realizar campanhas de consciencialização.
Mau funcionamento e/ou ineficiência dos equipamentos.	Incompatibilidade do sistema para consumidores finais.	Danos nos equipamentos e redução da sua vida útil. Formação de monóxido de carbono por combustões incompletas.	3	3	3	27	Moderado	Modificar ou substituir os equipamentos existentes por equipamentos compatíveis com misturas de hidrogénio com gás natural. Ajustar configurações do queimador.
Dificuldade na separação do hidrogénio em pontos de utilização final.	Falta de equipamentos e tecnologias avançadas de separação.	Aumento dos custos devido à complexidade da separação. Incapacidade de fornecer hidrogénio de alta pureza para aplicações específicas.	3	2	3	18	Moderado	Utilização de membranas ou adsorção por oscilação de pressão.

4.3.1 Análise de resultados

Realizada a análise dos modos de falha e seus efeitos aplicada à injeção de hidrogénio em *pipelines* existentes de gás natural, de seguida procedeu-se à análise e interpretação dos resultados obtidos.

Após análise da Tabela 4.9, foi possível sintetizar os resultados obtidos na Tabela 4.10, indicando as frequências relativas aos graus de risco obtidos. Verifica-se que dos 10 modos de falha identificados (referentes a distintas causas associadas), 6 apresentam um grau de risco moderado e 4 apresentam um grau de risco baixo. Não foram identificados riscos de grau elevado associados à injeção de hidrogénio em *pipelines* existentes de gás natural

Tabela 4.10 - Nº de modos de falha identificados por grau de risco.

Grau de risco	Modos de falha identificados
Moderado	6
Baixo	4
Total	10

A partir do gráfico da Figura 4.3, é possível observar as percentagens de incidência segundo o grau de risco, com o grau de risco moderado a totalizar 60% dos modos de falha identificados e o grau de risco baixo representa 40%.

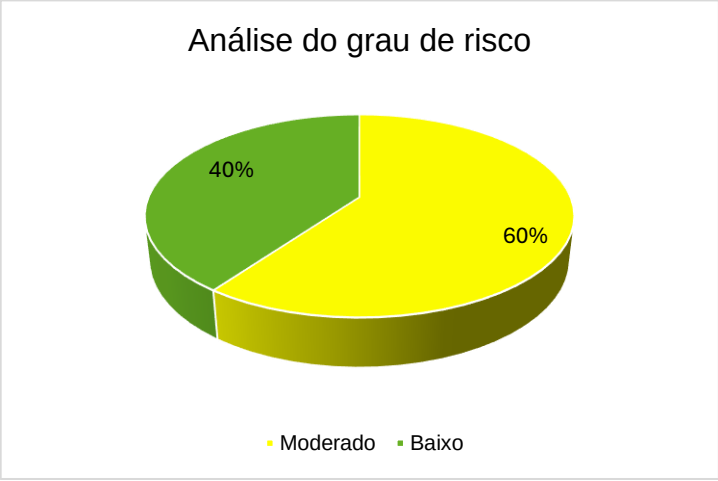


Figura 4.3 - Gráfico de análise do grau de risco.

Pela interpretação do gráfico da Figura 4.3 juntamente com a Tabela 4.10, conclui-se que 60% da totalidade dos modos de falha identificados (risco moderado) irão necessitar de uma ação prioritária para diminuir o seu grau de risco. Na Tabela 4.9 estão também identificadas algumas ações recomendadas para cada modo de falha que podem ser adotadas para reduzir o grau de risco. Os restantes 40% têm um grau de urgência consideravelmente menor pelo que não obrigam a uma intervenção imediata para implementar as ações de melhoria.

5 Conclusões e trabalho futuro

5.1 Conclusões

A descarbonização do planeta é um dos objetivos estipulados por países de todo o mundo até 2050. Num mundo cada vez menos dependente de combustíveis fósseis, o hidrogénio tem um papel fulcral para acelerar essa mudança e se atingir a neutralidade carbónica. O hidrogénio é o elemento químico que mais existe na natureza. A sua procura global como combustível triplicou desde 1975. O objetivo é atingir 30 toneladas de hidrogénio verde até 2030. Além disso, o hidrogénio verde é uma fonte de energia limpa que só emite vapor de água e não deixa resíduos no ar, ao contrário do carvão e do petróleo. A sua produção a partir de fontes de energia renováveis pode substituir a utilização de combustíveis fósseis. São as múltiplas utilizações, sempre eficientes do ponto de vista ambiental, que deixam o hidrogénio na linha da frente no setor da energia. Pode ser utilizado para completar ou substituir o gás natural em determinadas indústrias; pode vir a ser o 'combustível' de eleição para meios de transporte nos casos em que a eletricidade não é suficiente - veículos pesados, ferrovia, aviação, navegação marítima; pode ser produzido com recurso a eletricidade para aproveitar os períodos de menor procura da rede; e pode também ser utilizado para gerar energia elétrica em períodos de maior procura e menor produção.

Relativamente à injeção do hidrogénio em *pipelines* existentes de gás natural, conclui-se que a máxima quantidade de gás transportada ao longo da tubagem é alcançada quando não existe presença de hidrogénio na mistura gasosa. Como o hidrogénio tem um peso molecular inferior, o gás expande e é entregue em menor quantidade quando injetado na tubagem de gás natural. A simulação realizada no âmbito do estudo exemplificativo apresentado no subcapítulo 2.4.2, demonstrou que a quantidade de hidrogénio que pode ser injetada na rede ilustrada na Figura 2.3 é de 9,85% do total da mistura gasosa. Até esta concentração de hidrogénio os valores de pressão de entrada e saída da rede permanecem entre os limites definidos garantindo

que as tubagens permanecem seguras. No que diz respeito ao rendimento dos compressores da rede ilustrada na Figura 2.3, registaram o seu valor máximo de rendimento na presença da quantidade máxima de hidrogénio considerada (9,85%), porém foi também onde se registou o valor mais alto de consumo de combustível.

Da apresentação da FMEA no capítulo 4, aplicada a *pipelines* de hidrogénio e sistemas interligados, é possível concluir que os principais perigos das infraestruturas de hidrogénio causados por emissões indesejadas de H_2 incluem fugas, incêndios, deflagrações e explosões, e no que diz respeito aos tanques de armazenamento, *pipelines* e dispensadores enfrentam tensões cíclicas térmicas e de pressão que podem levar a libertações inseguras de hidrogénio. De entre os vários modos de falha identificados, os que apresentam um nível de risco mais elevado, e que por isso devem ser concentrados esforços imediatos para os mitigar, prendem-se essencialmente com o mau funcionamento do sistema da válvula de alívio de pressão devido a temperaturas criogénicas, fuga de hidrogénio na bomba criogénica e nos acessórios da tubagem que conectam ao evaporador por vedação deficiente, e rotura por colisão ou acidente externo no evaporador. Quanto ao capítulo 4.3, onde foram apresentados os principais riscos do transporte de hidrogénio em *pipelines* existentes de gás natural, é possível concluir que o facto de se utilizarem infraestruturas e equipamentos que não foram projetados para operar com misturas de hidrogénio com gás natural, leva à ocorrência de falhas operacionais que podem ter consequências devastadoras, pelo que é muito importante adaptar a infraestrutura, componentes, parâmetros de operação, entre outros, a esta mistura gasosa, para que se consiga alcançar a máxima eficiência energética.

5.2 Trabalho futuro

De forma a dar continuidade ao estudo realizado no presente trabalho, e com o objetivo de diminuir a probabilidade de ocorrência das causas dos modos de falha identificados, dever-se-á realizar um levantamento completo de mais informações relativas a *pipelines* de hidrogénio, como histórico de avarias, de acidentes envolvendo pessoas e o meio-ambiente, planos de manutenção (tendo em consideração os riscos apresentados) e custos de manutenção, por forma a completar a informação reunida até ao momento e para que a aplicação da FMEA possa assentar em dados menos teóricos e mais reais.

Os modos de falha identificados em alguns dos equipamentos aplicam-se também a outros equipamentos importantes como compressores, todo o tipo de bombas, etc., pelo que será importante expandir a FMEA apresentada no sentido de incluir todos os equipamentos que constituam uma rede de *pipelines* e associar esses modos de falha também a estes equipamentos, para além de eventuais modos de falha característicos dos mesmos.

Uma vez que o trabalho desenvolvido não detalha o tipo meio envolvente dos *pipelines* e de toda a infraestrutura, dever-se-á realizar um levantamento mais exaustivo dos riscos e modos de falha em *pipelines* associados a cada tipo de meio onde estes se encontram instalados, sejam eles subterrâneos, à superfície ou submersos (assentes no leito de um rio ou mar), uma vez que cada tipo de meio dá origem a riscos e modos de falha específicos.

Referências bibliográficas

Air Liquide. (2022). *Storing Hydrogen.* https://energies.airliquide.com/resources-planet-hydrogen/how-hydrogen-stored. Acedido em 15 de Dezembro de 2022.

Arya, A. K., Katiyar, R., Senthil Kumar, P., Kapoor, A., Pal, D. B., & Rangasamy, G. (2023). A multi-objective model for optimizing hydrogen injected-high pressure natural gas pipeline networks. *International Journal of Hydrogen Energy*, *48*(76), 29699–29723. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.133

Brittanica. (2019, setembro). *Pipeline - Design and operation*. https://www.britannica.com/technology/pipeline-technology/Design-and-operation. Acedido em 15 de Dezembro de 2022.

Chen, Z. F., Chu, W. P., Wang, H. J., Li, Y., Wang, W., Meng, W. M., & Li, Y. X. (2022). Structural integrity assessment of hydrogen-mixed natural gas pipelines based on a new multi-parameter failure criterion. *Ocean Engineering*, *247*. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110731

Chen, Z., Chen, Y., Wang, W., Lu, K., Yang, H., & Zhu, W. (2020). Failure pressure analysis of hydrogen storage pipeline under low temperature and high pressure. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(43), 23142–23150. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.129

CONSOL Energy: (2015, maio 18). *Pipeline Safety*. Web.archive.org. https://web.archive.org/web/20150518101537/http://www.consolenergy.com/natural-gas-amp-coal/natural-gas/pipeline-safety.aspx. Acedido em 15 de Dezembro de 2022.

Correa-Jullian, C., & Groth, K. M. (s.d.). *Liquid Hydrogen Storage System FMEA and Data Requirements for Risk Analysis*.

Department of Defense (1993). MIL-STD-882C – *Military Standard – System Safety Program Requirements*.

EDP. (2021, março 29.). *Hidrogénio: O elemento transformador da economia e do planeta.* https://www.edp.com/pt-pt/historias-edp/o-que-e-o-hidrogenio. Acedido em 20 de Dezembro de 2022.

Gomes, J. (2022). *Eletrólise da água na obtenção de hidrogénio*. Revista de Ciência Elementar, 10(2). https://doi.org/10.24927/RCE2022.025

Hadef, H., Negrou, B., Ayuso, T. G., Djebabra, M., & Ramadan, M. (2020). Preliminary hazard identification for risk assessment on a complex system for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(20), 11855–11865. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.162

Hayrton. (2012, junho 19). *Análise de causa e consequência*. QUALIDADEONLINE'S BLOG. https://qualidadeonline.wordpress.com/2012/06/19/analise-de-causa-e-consequencia/. Acedido em 20 de Fevereiro de 2023.

Infraspeak Team. (2023, agosto 29). *Tudo sobre a Análise de Árvore de Falhas*. Infraspeak Blog. https://blog.infraspeak.com/pt-pt/analise-arvore-de-falhas/. Acedido em 20 de Fevereiro de 2023.

ISO (2018). ISO 31000 - *Risk Management - Guidelines*. International Organization for Standardization. Geneve

ISO (2019). ISO 31010 - *Risk Management - Risk Assessment Techniques*. International Organization for Standardization. Geneve

Kikukawa, S., Mitsuhashi, H., & Miyake, A. (2009). Risk assessment for liquid hydrogen fueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*, *34*(2), 1135–1141. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.10.093

Kim, W. J., Park, Y., & Park, D. J. (2024). Quantitative risk assessments of hydrogen blending into transmission pipeline of natural gas. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *91*, 105412. https://doi.org/10.1016/J.JLP.2024.105412

Li, F., Zhang, L., Dong, S., Xu, L., Zhang, H., & Chen, L. (2024). Risk assessment of bolt-gasket-flange connection (BGFC) failures at hydrogen transfer stations based on improved FMEA. *International Journal of Hydrogen Energy*, *50*, 700–716. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.191

Liu, X. Y., Sun, Z. Y., & Yi, Y. (2024). Progress in spontaneous ignition of hydrogen during high-pressure leakage with the considerations of pipeline storage and delivery. *Applications in Energy and Combustion Science*, *20*, 100290. https://doi.org/10.1016/J.JAECS.2024.100290

Microsoft. (s.d.). *Criar um diagrama de análise da árvore de falhas - Suporte da Microsoft*. https://support.microsoft.com/pt-pt/topic/criar-um-diagrama-de-an%C3%A1lise-da-%C3%A1rvore-de-falhas-11d9daff-46ea-47f8-82de-e0b5e37ade20. Acedido em 25 de Março de 2023.

Milioulis, K., Bolbot, V., & Theotokatos, G. (2021). Model-based safety analysis and design enhancement of a marine LNG fuel feeding system. *Journal of Marine Science and Engineering*, *9*(1), 1–25. https://doi.org/10.3390/jmse9010069

Mohtadi-Bonab, M. A. (2022). Effect of different parameters on hydrogen affected fatigue failure in pipeline steels. In *Engineering Failure Analysis* (Vol. 137). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106262

Moura, C. (2000). Análise de Modo e Efeitos de Falha Potencial (FMEA) Manual de Referência SAE J-1739. ASQC.

Nakayama, J., Kasai, N., Shibutani, T., & Miyake, A. (2019). Security risk analysis of a hydrogen fueling station with an on-site hydrogen production system involving methylcyclohexane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 9110–9119. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.177

Nakayama, J., Sakamoto, J., Kasai, N., Shibutani, T., & Miyake, A. (2016). Preliminary hazard identification for qualitative risk assessment on a hybrid gasoline-hydrogen fueling station with an on-site hydrogen production system using organic chemical hydride. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*(18), 7518–7525. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.143

Nigen. (2020, junho 30). *How to Pig a Pipeline - Gas Pipeline Pigging Procedure.* https://nigen.com/how-to-pig-a-pipeline-gas-pipeline-pigging-procedure/. Acedido em 20 de Dezembro de 2022.

Ruiz-Tagle, A., & Groth, K. M. (2024). Comparing the risk of third-party excavation damage between natural gas and hydrogen pipelines. *International Journal of Hydrogen Energy*, *57*, 107–120. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2023.12.195

Shehata, M. F., & El-Shamy, A. M. (2023). Hydrogen-based failure in oil and gas pipelines a review. In *Gas Science and Engineering* (Vol. 115). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2023.204994

Sobel, P. J., Murdock, D. C., Thomson, J. C., & Miller, P. K. (2020). *The Institute of Internal Auditors (IIA) Preface COSO Board Members.*

Viana, F. F. C. L., Alencar, M. H., Ferreira, R. J. P., & de Almeida, A. T. (2022). Multidimensional risk assessment and categorization of hydrogen pipelines. *International Journal of Hydrogen Energy*, *47*(42), 18424–18440. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.057

Wu, J., Zhou, R., Xu, S., & Wu, Z. (2017). *Probabilistic analysis of natural gas pipeline network accident based on Bayesian network*. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.01.025

Xu, S., Huang, S., Guo, D., Zhao, Y., & Song, M. (2017). Failure analysis of a carbon steel pipeline exposed to wet hydrogen sulfide environment. *Engineering Failure Analysis*, *71*, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.11.001

Zhang, H., & Tian, Z. (2022). Failure analysis of corroded high-strength pipeline subject to hydrogen damage based on FEM and GA-BP neural network. *International Journal of Hydrogen Energy*, *47*(7), 4741–4758. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.082