

**ANÁLISE SISTÉMICA E NÃO LINEAR DE ACIDENTES EM
SISTEMAS DE TRANSPORTE URBANO SOBRE CARRIS:
COMPARAÇÃO ENTRE O ASCENSOR DA GLÓRIA E O
ELÉTRICO DE SANTA TERESA ATRAVÉS DO MÉTODO FRAM**

LAIDE RIBEIRO TORRES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA DE SEGURANÇA E HIGIENE OCUPACIONAIS

Orientador: Professor Doutor Mário A. P. Vaz

Coorientador: Professor Doutor Josué E. Maia França

JUNHO 2026

MESTRADO EM ENGENHARIA DE SEGURANÇA E HIGIENE OCUPACIONAIS 2025/2026

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E GEORRECURSOS

Tel. +351-22-508 1901

✉ mesho@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia de Segurança e Higiene Ocupacionais - 2025/2026 - Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2026*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus pais

Conhecimento é Poder

Francis Bacon

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer ao Professor Doutor Mário Vaz pela orientação, disponibilidade, apoio e pelas importantes contribuições fornecidas ao longo do desenvolvimento desta dissertação. Agradeço igualmente pelas reuniões, orientações e materiais disponibilizados, fundamentais para a realização deste trabalho.

Quero expressar um agradecimento especial ao Professor Doutor Josué França, coorientador desta dissertação, pela enorme generosidade, disponibilidade e apoio prestado mesmo à distância, entre Brasil e Portugal. O seu conhecimento, experiência e contributo académico na área do FRAM, Engenharia de Resiliência e Safety-II foram fundamentais para o desenvolvimento deste estudo.

Quero ainda agradecer a todas as pessoas que me incentivaram a continuar os estudos e a acreditar na concretização deste objetivo académico, especialmente nos momentos mais difíceis desta caminhada.

À minha família, pelo apoio, compreensão, incentivo e presença constante ao longo destes anos, o meu sincero agradecimento.

Ao meu filho Ian Torres, pela motivação diária e pela força que me impulsionou a continuar esta trajetória.

RESUMO

Os acidentes em sistemas de transporte urbano resultam frequentemente da interação entre múltiplos elementos presentes no sistema, tornando insuficiente a sua explicação através de relações lineares de causa e efeito. Em sistemas sociotécnicos complexos, pequenas variações nas atividades realizadas no quotidiano podem combinar-se e contribuir para a ocorrência de eventos críticos.

O presente trabalho teve como objetivo analisar acidentes desta natureza através de uma abordagem sistêmica e não linear, recorrendo ao Functional Resonance Analysis Method (FRAM). O estudo incidiu sobre dois acidentes ocorridos em sistemas de transporte urbano sobre carris: o acidente do Ascensor da Glória, em Lisboa, em 2025, e o acidente do Bondinho de Santa Teresa, no Rio de Janeiro, em 2011.

A investigação fundamentou-se nos princípios da Engenharia de Resiliência e na perspetiva Safety-II, segundo os quais os acidentes emergem da interação entre diferentes funções do sistema e não apenas de falhas isoladas.

A metodologia baseou-se na análise documental de relatórios de investigação, uma dissertação académica e publicações científicas relacionadas com os casos estudados e com o método FRAM. Com base nestas fontes, foram desenvolvidos modelos FRAM para cada caso e realizada uma análise comparativa dos acidentes.

Os resultados evidenciaram que nenhum dos acidentes pode ser explicado por uma única causa. Em ambos os casos, a ocorrência dos eventos esteve associada à combinação de diferentes condições presentes nos sistemas analisados. A aplicação do FRAM permitiu compreender como as interações entre funções contribuíram para as condições que antecederam os acidentes. Os resultados reforçam a relevância das abordagens sistêmicas e não lineares para a análise de acidentes em sistemas complexos de transporte urbano.

PALAVRAS-CHAVE: FRAM, Engenharia de Resiliência, Safety-II, acidentes, transporte urbano sobre carris.

ABSTRACT

Accidents in urban transport systems often result from the interaction of multiple elements within the system, making explanations based solely on linear cause-and-effect relationships insufficient. In complex sociotechnical systems, small variations in everyday activities may combine and contribute to the occurrence of critical events.

This study aimed to analyse accidents of this nature through a systemic and non-linear approach using the Functional Resonance Analysis Method (FRAM). The research focused on two accidents involving urban rail transport systems: the Ascensor da Glória accident in Lisbon, Portugal, in 2025, and the Santa Teresa tram accident in Rio de Janeiro, Brazil, in 2011.

The study was grounded in the principles of Resilience Engineering and the Safety-II perspective, according to which accidents emerge from the interaction of different system functions rather than from isolated failures.

The methodology was based on the documentary analysis of investigation reports, an academic dissertation and scientific publications related to the case studies and the FRAM method. Based on these sources, FRAM models were developed for each case and a comparative analysis of the accidents was conducted.

The results showed that neither accident could be explained by a single cause. In both cases, the occurrence of the accidents was associated with the combination of different conditions present within the analysed systems. The application of FRAM made it possible to understand how interactions between functions contributed to the conditions that preceded the accidents. The findings reinforce the relevance of systemic and non-linear approaches for the analysis of accidents in complex urban transport systems.

KEYWORDS: FRAM, Resilience Engineering, Safety-II, accidents, urban rail transport.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETO DE ESTUDO	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 METODOLOGIA	4
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	6
2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO	9
2.1 SISTEMAS SOCIOTÉCNICOS E ANÁLISE DE ACIDENTES	9
2.2 ENGENHARIA DE RESILIÊNCIA E A ABORDAGEM SAFETY II.....	10
2.3 VARIABILIDADE DE DESEMPENHO EM SISTEMAS SÓCIOTÉCNICOS.....	12
2.4 O <i>FRAM</i> (<i>FUNCTIONAL RESONANCE ANALYSIS METHOD</i>)	13
2.5 TRANSPORTES URBANOS SOBRE CARRIS E SEGURANÇA OPERACIONAL	15
2.6 APLICAÇÃO DA ANÁLISE SISTÊMICA E NÃO-LINEAR AOS ACIDENTES EM TRANSPORTES URBANOS	16
2.7 EVOLUÇÃO RECENTE DA METODOLOGIA FRAM.....	18
2.7.1 Evolução Histórica e Consolidação do Fram.....	18
2.7.2 Evolução Histórica e Consolidação do Fram.....	20
2.7.3 Extensões Metodológicas e Integração com outras Abordagens.....	22
2.7.4 Tendências Recentes da Investigação	24
2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO ENQUADRAMENTO TEÓRICO	26

3 CARACTERIZAÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO 29

3.1 O CASO DO ASCENSOR DA GLÓRIA..... 29

3.1.1 Caracterização Histórica e Operacional do Ascensor da Glória 29

3.1.2 Sistema de Operação, Manutenção e Segurança do Ascensor da Glória... 32

3.1.3 Caracterização do Acidente do Ascensor da Glória 35

3.1.4 Principais Constatações Preliminares da Investigação 37

3.2 O CASO DO ELÉTRICO DE SANTA TERESA..... 40

3.2.1 Caracterização Histórica e Operacional do Elétrico de Santa Teresa 40

3.2.2 Operação, Manutenção e Funcionamento do Sistema..... 42

3.2.3 Caracterização do Acidente do Elétrico de Santa Teresa 44

3.2.4 Principais Fatores Identificados após o Acidente 46

4 CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DOS MODELOS FRAM 49

4.1 MODELO FRAM DO ASCENSOR DA GLÓRIA..... 49

4.1.1 Identificação das funções 49

4.1.2 Descrição das Funções e dos Acoplamentos..... 51

4.1.3 Organização Funcional do Modelo Fram do Ascensor da Glória 54

4.1.3.1 Condições Organizacionais e Regulatórias..... 56

4.1.3.2 Seleção, Aceitação e Utilização do Cabo..... 56

4.1.3.3 Manutenção, Inspeção e Detecção de Condições Degradadas..... 57

4.1.3.4 Degradação Progresssiva do Cabo durante a Operação 58

4.1.3.5 Sistemas de Segurança e Ocorrência do Acidente 58

4.1.4 Representação Gráfica do Modelo Fram do Ascensor da Glória 59

4.1.5 Análise da Variabilidade Funcional..... 61

4.1.6 Análise da Ressonância Funcional..... 63

4.2 MODELO FRAM DO ELÉTRICO DE SANTA TERESA 66

4.2.1 Identificação das Funções 67

4.2.2 Descrição das Funções e dos Acoplamentos..... 68

4.2.3 Organização Funcional do Modelo Fram do Elétrico de Santa Teresa..... 71

4.2.3.1 Condições Organizacionais e Históricas 73

4.2.3.2 Continuidade Operacional do Sistema 75

4.2.3.3 Pressão Operacional e utilização 77

4.2.3.4 Dinâmica Imediata do Acidente.....	78
4.2.4 Estrutura do Modelo FRAM de Santa Teresa	80
4.2.5 Análise da Variabilidade Funcional	83
4.2.6 Análise da Ressonância Funcional	86
5 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O ASCENSOR DA GLÓRIA E O ELÉTRICO SANTA TERESA	91
5.1 INTRODUÇÃO A ANÁLISE COMPARATIVA	91
5.2 COMPARAÇÃO DAS CONDIÇÕES ORGANIZACIONAIS E HISTÓRICAS	92
5.3 COMPARAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS	94
5.4 COMPARAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO SISTEMA	96
5.5 COMPARAÇÃO DOS MECANISMOS DE RESSONÂNCIA FUNCIONAL.....	98
6 CONCLUSÕES	103
6.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES DA INVESTIGAÇÃO	103
6.2 CONTRIBUTOS DA INVESTIGAÇÃO.....	105
6.3 LIMITAÇÕES DO ESTUDO	106
6.4 RECOMENDAÇÕES	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111
APÊNDICE	115
APÊNDICE A FUNDAMENTAÇÃO DOCUMENTAL DAS FUNÇÕES CONSIDERADAS NO MODELO FRAM DO ASCENSOR DA GLÓRIA	115
APÊNDICE B – FUNDAMENTAÇÃO DOCUMENTAL DAS FUNÇÕES CONSIDERADAS NO MODELO FRAM DO ELÉTRICO DE SANTA TERESA	117
APÊNDICE C – DECLARAÇÃO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 - Esquema de funcionamento do Ascensor da Glória, evidenciando as cabinas, o cabo de tração/equilíbrio, os motores elétricos, os trambolhos e o volante de inversão.....	18
Fig. 2 - Disposição dos trambolhos e dos destorcedores, evidenciando a fixação do cabo de tração/equilíbrio e do cabo de ligação entre trambolhos.....	19
Fig. 3 - Sequência dos principais eventos ocorridos durante o acidente do Ascensor da Glória, incluindo a posição aproximada da rotura da ligação do cabo, o descarrilamento, os embates e a imobilização das cabinas.....	23
Fig.4 - Sequência dos principais eventos ocorridos durante o acidente do Ascensor da Glória, incluindo a posição aproximada da rotura da ligação do cabo, o descarrilamento, os embates e a imobilização das cabinas.....	26
Fig. 5 - Bonde de Santa Teresa atravessando os Arcos da Lapa no início do século XX.....	28
Fig. 6 - Bonde n.º 10 após o acidente ocorrido na Rua Joaquim Murtinho, Rio de Janeiro, em 27 de agosto de 2011	31
Figura 7 – Modelo FRAM do Ascensor da Glória.....	45
Figura 8 – Principal trajetória de propagação da variabilidade identificada no modelo FRAM do Ascensor da Glória.....	50
Figura 9– Modelo FRAM do Elétrico de Santa Teresa.....	67
Figura 10– Simulação da propagação da variabilidade e da ressonância funcional no modelo FRAM do Elétrico de Santa Teresa.....	77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Funções Identificadas no Modelo Fram do Ascensor da Glória	51
Tabela 2 - Agrupamento Funcional das Funções Consideradas no Modelo FRAM do Ascensor da Glória	55
Tabela 3 - Funções Consideradas no Modelo FRAM do Elétrico de Santa Teresa	69
Tabela 4 - Agrupamento Funcional das Funções Consideradas no Modelo FRAM do Elétrico de Santa Teresa	72
Tabela 5 - Fundamentação Documental das Funções Considerada no Modelo FRAM do Ascensor da Glória	Erro! Indicador não definido.
Tabela 6 - Fundamentação Documental das Funções Consideradas no Modelo FRAM do Elétrico de Santa Teresa	Erro! Indicador não definido.

ACRÓNIMOS

<i>CCFL</i>	Companhia Carris de Ferro de Lisboa
<i>FRAM</i>	Functional Resonance Analysis Method
<i>FMV</i>	FRAM Model Visualiser
<i>GPIAAF</i>	Gabinete de Prevenção e Investigação de Acidentes com Aeronaves e de Acidentes Ferroviários

1

INTRODUÇÃO

1.1 OBJETO DE ESTUDO

Os sistemas de transporte urbano desempenham um papel fundamental na mobilidade das populações e no funcionamento das cidades, estando diretamente relacionados com fatores sociais, económicos, técnicos e operacionais.

Entre estes sistemas, os transportes sobre trilhos, nomeadamente ascensores e elétricos históricos, apresentam características particulares devido à sua complexidade técnica, às exigências contínuas de manutenção e à necessidade de adaptação das operações às condições reais de funcionamento.

Apesar dos avanços tecnológicos e das estratégias de segurança implementadas ao longo das últimas décadas, continuam a ocorrer acidentes que evidenciam fragilidades relacionadas com manutenção, supervisão técnica, gestão organizacional e funcionamento real dos sistemas.

Tradicionalmente, a análise de acidentes esteve centrada numa perspetiva linear de causa e efeito, procurando identificar uma falha principal responsável pelo evento ocorrido. No entanto, segundo Hollnagel (2012), os acidentes em sistemas sociotécnicos complexos dificilmente resultam de uma única causa isolada, sendo frequentemente consequência da interação entre múltiplos elementos presentes no sistema.

Neste contexto, permanece o desafio de compreender de forma integrada como as interações existentes entre as diferentes atividades de operação, manutenção, supervisão e gestão podem contribuir para a ocorrência de acidentes. As abordagens tradicionais podem revelar limitações na explicação de eventos complexos, uma vez que tendem a privilegiar relações lineares de

causalidade e nem sempre permitem compreender os mecanismos através dos quais pequenas variabilidades se propagam ao longo do sistema e influenciam o seu comportamento global.

A Engenharia de Resiliência e a abordagem Safety-II procuram compreender o funcionamento real dos sistemas, considerando as adaptações realizadas no quotidiano operacional para garantir a continuidade das atividades. Estas abordagens propõem analisar os acidentes para além da identificação de falhas isoladas, considerando as interações existentes entre operação, manutenção, supervisão técnica, gestão organizacional e condições reais de funcionamento. Segundo Hollnagel (2012), compreender a forma como os sistemas normalmente funcionam é fundamental para compreender também a ocorrência de eventos indesejados.

Neste contexto, o *Functional Resonance Analysis Method* (FRAM), desenvolvido por Erik Hollnagel, apresenta-se como uma ferramenta adequada para a análise de acidentes complexos sob uma perspetiva sistêmica e não linear.

O método permite representar os sistemas a partir das suas funções e analisar os acoplamentos existentes entre elas, possibilitando compreender de que forma pequenas variabilidades nas atividades podem propagar-se ao longo do sistema e contribuir para o desenvolvimento de acidentes. Estudos recentes que recorrem ao FRAM têm demonstrado a relevância das abordagens sistêmicas e não lineares na compreensão de acidentes e de outros fenómenos complexos em diferentes contextos operacionais, evidenciando também a expansão da sua aplicação em diferentes domínios de engenharia e segurança (Patriarca et al., 2020; Tierra-Arévalo et al., 2024; dos Santos et al., 2025).

A presente investigação centra-se na análise comparativa entre dois acidentes em sistemas de transporte urbano: o acidente do Ascensor da Glória, ocorrido em Lisboa em 2025, e o acidente com o Elétrico de Santa Teresa, ocorrido no Rio de Janeiro em 2011. Apesar das diferenças existentes entre os dois sistemas e entre os contextos em que os acidentes ocorreram, ambos envolvem transportes urbanos históricos sujeitos a processos contínuos de manutenção, adaptação operacional e gestão da segurança.

O acidente do Elétrico de Santa Teresa provocou um elevado número de vítimas e gerou discussões relacionadas com manutenção, condições operacionais, supervisão técnica e funcionamento do sistema. De forma semelhante, o acidente do Ascensor da Glória evidenciou questões relacionadas com a integridade do cabo, os sistemas de travagem, a manutenção, a

conformidade técnica e a supervisão operacional. Em ambos os casos, os acidentes ultrapassam uma interpretação baseada numa falha isolada, exigindo uma análise capaz de compreender as interações existentes entre diferentes elementos do sistema.

A escolha destes dois acidentes fundamenta-se na sua relevância técnica e organizacional, bem como na possibilidade de identificar semelhanças, diferenças e padrões sistémicos comuns através da aplicação do FRAM. Pretende-se compreender de que forma as variabilidades existentes nas atividades quotidianas, nas práticas de manutenção, na condução das operações e na coordenação da segurança podem ter influenciado o comportamento global dos sistemas e contribuído para o desenvolvimento das ocorrências analisadas.

Desta forma, a presente investigação pretende contribuir para uma melhor compreensão dos acidentes em sistemas sociotécnicos complexos de transporte urbano, reforçando a importância de abordagens sistémicas e não lineares na análise de ocorrências indesejadas. Pretende-se ainda contribuir para as discussões relacionadas com a gestão da segurança, a Engenharia de Resiliência e a prevenção de acidentes em sistemas complexos, considerando o funcionamento real das operações e as interações existentes entre os diferentes elementos dos sistemas analisados.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal realizar uma análise sistémica e não-linear entre o acidente do Ascensor da Glória, ocorrido em Lisboa no ano de 2025, e o acidente com o Elétrico de Santa Teresa, ocorrido no Rio de Janeiro em 2011, utilizando o método Functional Resonance Analysis Method (FRAM).

A investigação procura compreender de que forma as interações existentes nos sistemas sociotécnicos podem contribuir para o desenvolvimento de acidentes em sistemas de transporte urbano. Pretende-se analisar os acidentes para além de uma perspetiva linear de causa e efeito, considerando o funcionamento real dos sistemas, as adaptações realizadas no quotidiano operacional e as variabilidades presentes nas diferentes atividades.

Neste contexto, o trabalho pretende identificar as funções relevantes existentes nos dois sistemas estudados e analisar os respetivos acoplamentos, procurando compreender de que forma pequenas variabilidades podem propagar-se ao longo das operações e influenciar o comportamento global dos sistemas. Pretende-se ainda analisar as cadeias de eventos dos acidentes, identificando possíveis similaridades, diferenças e sobreposições entre os dois casos. De forma específica, o presente trabalho procura:

- Analisar os acidentes do Ascensor da Glória e do Elétrico de Santa Teresa sob uma perspetiva sistémica e não-linear;
- Identificar os principais fatores técnicos, humanos, organizacionais e operacionais envolvidos nos acidentes;
- Compreender o funcionamento real dos sistemas durante as operações quotidianas;
- Identificar as funções relevantes de cada sistema e os respetivos acoplamentos através do método FRAM;
- Analisar de que forma as variabilidades das atividades podem influenciar o comportamento global dos sistemas;
- Comparar os dois acidentes à luz dos princípios da Engenharia de Resiliência e da perspetiva Safety-II;
- Contribuir para as discussões relacionadas com gestão da segurança e prevenção de acidentes em sistemas sociotécnicos complexos.

Espera-se que a presente investigação contribua para uma melhor compreensão dos acidentes em sistemas de transporte urbano, reforçando a importância de abordagens sistémicas e não-lineares na análise de eventos complexos e no desenvolvimento de estratégias relacionadas com segurança operacional e resiliência organizacional.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia adotada no presente trabalho baseia-se numa abordagem qualitativa, documental e comparativa, fundamentada nos princípios da Engenharia de Resiliência, do paradigma Safety-II e na aplicação do *Functional Resonance Analysis Method* (FRAM).

A investigação procura compreender os acidentes a partir de uma perspetiva sistémica e não linear, considerando as relações estabelecidas entre as diferentes atividades que compõem o sistema.

Inicialmente será realizada uma revisão bibliográfica sobre sistemas sociotécnicos complexos, Engenharia de Resiliência, Safety-II e método FRAM, com o objetivo de fundamentar teoricamente a investigação e compreender os principais conceitos relacionados com a análise não-linear de acidentes. Nesta etapa serão analisados livros, artigos científicos, dissertação académica e outros trabalhos relevantes relacionados com a aplicação do método FRAM em diferentes contextos operacionais.

Posteriormente, será realizada uma análise documental dos acidentes estudados, nomeadamente do acidente do Ascensor da Glória, ocorrido em Lisboa no ano de 2025, e do acidente com o Elétrico de Santa Teresa, ocorrido no Rio de Janeiro em 2011. Para tal, serão utilizados relatórios técnicos, documentos oficiais de investigação, dissertação académica, artigos científicos, documentos históricos e outros materiais relacionados com os sistemas analisados.

Após a análise documental, serão identificadas as funções relevantes de cada sistema para construção dos modelos FRAM correspondentes aos dois acidentes. A modelação permitirá representar os sistemas a partir das suas funções e analisar os acoplamentos existentes entre elas, possibilitando compreender de que forma pequenas variabilidades nas atividades podem propagar-se ao longo do sistema e contribuir para o desenvolvimento dos eventos críticos.

Importa refer que o acidente do Ascensor da Glória se encontra ainda em investigação e sujeito a restrições associadas ao segredo de justiça, pelo que a informação atualmente disponível sobre as causas e circunstâncias é ainda limitada.

A análise dos modelos FRAM será realizada considerando os princípios da Engenharia de Resiliência e do enquadramento Safety-II, procurando compreender o funcionamento real das operações, as adaptações realizadas no quotidiano operacional e as interações existentes entre os diferentes elementos dos sistemas estudados.

Por fim, será realizada uma análise comparativa entre os dois acidentes, procurando identificar similaridades, diferenças e possíveis sobreposições entre as cadeias de eventos dos casos analisados. Pretende-se compreender de que forma as adaptações e variabilidades presentes nas atividades quotidianas podem ter influenciado o comportamento global dos sistemas e contribuído para o desenvolvimento dos acidentes.

A metodologia adotada procura contribuir para uma melhor compreensão dos acidentes em sistemas sociotécnicos complexos de transporte urbano, reforçando a importância de abordagens sistémicas e não-lineares na análise de eventos indesejados e na gestão da segurança operacional.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos, desenvolvidos de forma a permitir uma compreensão progressiva do tema, da fundamentação teórica, da metodologia adotada e da análise dos acidentes estudados.

No Capítulo 1 é apresentada a introdução ao trabalho, incluindo o enquadramento do tema, o objeto do estudo, os objetivos da investigação, a metodologia adotada e a estrutura geral da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta o enquadramento teórico da investigação, abordando conceitos relacionados com sistemas sociotécnicos complexos, Engenharia de Resiliência, abordagem Safety-II e *Functional Resonance Analysis Method* (FRAM). Neste capítulo são também apresentados os principais conceitos relacionados com análise sistémica e não-linear de acidentes.

No Capítulo 3 é apresentado o contexto dos sistemas de transporte urbano analisados, bem como a caracterização dos acidentes do Ascensor da Glória, ocorrido em Lisboa em 2025, e do Elétrico de Santa Teresa, ocorrido no Rio de Janeiro em 2011. São ainda abordados aspetos relacionados com funcionamento operacional, manutenção, supervisão técnica e gestão dos sistemas estudados.

O Capítulo 4 é dedicado à construção dos modelos FRAM dos acidentes analisados. Neste capítulo serão identificadas as funções relevantes dos sistemas, os respetivos acoplamentos e as variabilidades existentes nas atividades desenvolvidas durante as operações.

No Capítulo 5 desenvolve-se uma análise comparativa dos dois acidentes, evidenciando semelhanças, diferenças e possíveis padrões comuns entre os casos analisados. Os resultados serão discutidos à luz da Engenharia de Resiliência, do Safety-II e dos princípios da análise sistémica e não linear de acidentes.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões finais da investigação, as principais limitações do estudo e sugestões para trabalhos futuros relacionados com segurança operacional, análise de acidentes e aplicação do método FRAM em sistemas sociotécnicos complexos de transporte urbano.

2

ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1 SISTEMAS SOCIOTÉCNICOS E ANÁLISE DE ACIDENTES

Os acidentes em sistemas de transporte urbano envolvem frequentemente a combinação de múltiplas condições associadas ao funcionamento das operações, o que limita a sua compreensão através de modelos tradicionais baseados exclusivamente em relações lineares de causa e efeito. Revisões recentes da literatura sobre o FRAM e a Engenharia de Resiliência evidenciam que os sistemas sociotécnicos complexos são constituídos por relações dinâmicas e interdependentes, nas quais a variabilidade do desempenho pode propagar-se entre funções e contribuir para a emergência de acidentes, tornando necessárias abordagens de natureza sistêmica e não linear (Patriarca et al., 2020; Tierra-Arévalo et al., 2024).

Durante muitos anos, a análise de acidentes esteve centrada na procura de uma causa principal responsável pelo evento ocorrido. Esta perspetiva tradicional procurava identificar falhas técnicas, erros humanos ou incumprimentos operacionais como origem direta dos acidentes. Contudo, de acordo com Hollnagel (2012), acidentes em sistemas complexos raramente resultam de uma única causa isolada, sendo geralmente consequência da interação entre múltiplos fatores distribuídos ao longo do sistema.

Neste contexto, os sistemas sociotécnicos complexos exigem adaptações constantes durante o funcionamento quotidiano das operações. Segundo Hollnagel (2014), o desempenho humano e organizacional varia naturalmente em função das condições reais de trabalho, das limitações operacionais, da disponibilidade de recursos e das exigências do ambiente operacional. Estas adaptações normalmente permitem que os sistemas continuem a funcionar, mas determinadas combinações de variabilidades podem contribuir para comportamentos inesperados e acidentes.

Nos sistemas de transporte urbano sobre trilhos, como o Ascensor da Glória e o Elétrico de Santa Teresa, a segurança operacional depende da forma como as diferentes atividades são realizadas e coordenadas. Pequenas variabilidades nessas atividades podem interagir entre si e influenciar o comportamento global do sistema.

Segundo França et al. (2023), abordagens sistémicas aplicadas à análise de acidentes permitem compreender os eventos para além da identificação de falhas isoladas, considerando as interações existentes entre diferentes elementos do sistema sociotécnico. Desta forma, a análise sistémica procura compreender não apenas o momento final do acidente, mas também as condições existentes anteriormente ao evento, as adaptações realizadas durante as operações e os processos organizacionais envolvidos no funcionamento do sistema.

A presente investigação adota esta perspetiva sistémica e não linear para a análise dos acidentes do Ascensor da Glória e do Elétrico de Santa Teresa, procurando compreender de que forma as variabilidades e interações existentes no sistema podem ter contribuído para a ocorrência dos acidentes.

2.2 ENGENHARIA DE RESILIÊNCIA E A ABORDAGEM SAFETY II

A Engenharia de Resiliência surgiu como uma abordagem voltada para a compreensão da segurança em sistemas sociotécnicos complexos, centrando-se na capacidade dos sistemas de responder, adaptar-se e continuar a funcionar perante condições variáveis e, por vezes, imprevisíveis. Patriarca et al. (2020) e Tierra-Arévalo et al. (2024) referem que, nestes sistemas, o funcionamento real depende de adaptações contínuas às condições operacionais, uma vez que as atividades raramente decorrem exatamente conforme previsto nos procedimentos formais.

Tradicionalmente, a segurança foi analisada sob uma perspetiva conhecida como *Safety-I*, centrada principalmente na prevenção de falhas, acidentes e erros. Nesta abordagem, os acidentes são interpretados como resultado de falhas específicas que devem ser identificadas e eliminadas para evitar novas situações críticas. Contudo, esta abordagem apresenta limitações quando aplicada a sistemas sociotécnicos complexos, nos quais o funcionamento quotidiano depende constantemente de ajustamentos operacionais (Hollnagel, 2014; Patriarca et al., 2020).

Neste contexto, o Safety-II propõe compreender não apenas porque os sistemas falham, mas também porque normalmente conseguem funcionar. Nesta perspectiva, o desempenho humano não deve ser entendido apenas como uma potencial fonte de erro, mas também como um elemento essencial para a adaptação e a continuidade das operações (Hollnagel, 2014; Kaya et al., 2026). Desta forma, as variabilidades presentes no funcionamento quotidiano deixam de ser analisadas exclusivamente como falhas, passando também a ser compreendidas como uma característica inerente ao funcionamento dos sistemas sociotécnicos.

O enquadramento teórico do *Safety-II* insere-se no contexto da Engenharia de Resiliência, partilhando a preocupação com a compreensão do funcionamento real dos sistemas e com a capacidade de adaptação necessária para garantir a continuidade das operações.

A Engenharia de Resiliência procura compreender a capacidade dos sistemas de antecipar, monitorizar, responder e aprender com as condições operacionais. Nesta perspectiva, compreender o funcionamento real das atividades é essencial para compreender também o desenvolvimento de acidentes em sistemas sociotécnicos complexos (Hollnagel, 2012; Patriarca et al., 2020; Tierra-Arévalo et al., 2024).

Nos sistemas de transporte urbano, as adaptações realizadas durante as operações podem estar relacionadas com manutenção, controlo operacional, gestão de recursos, supervisão técnica e resposta às condições reais de funcionamento. Estas adaptações podem contribuir para o funcionamento seguro do sistema, mas também podem gerar variabilidades que, quando combinadas, influenciam o desenvolvimento de consequências adversas.

A aplicação dos conceitos da Engenharia de Resiliência e do Safety-II torna-se particularmente relevante na presente investigação, uma vez que permite analisar os acidentes do Ascensor da Glória e do Elétrico de Santa Teresa para além de uma perspectiva linear de causa e efeito, procurando compreender as interações existentes entre os diferentes elementos dos sistemas estudados.

2.3 VARIABILIDADE DE DESEMPENHO EM SISTEMAS SÓCIOTÉCNICOS

A variabilidade de desempenho constitui um dos conceitos centrais da Engenharia de Resiliência e da abordagem Safety-II. O funcionamento dos sistemas sociotécnicos não ocorre de forma totalmente previsível ou uniforme, uma vez que o desempenho é continuamente ajustado às condições reais de trabalho e influenciado por fatores humanos, organizacionais e pelas condições operacionais do sistema (Hollnagel, 2014; Kaya et al., 2026).

No funcionamento quotidiano dos sistemas, os operadores, supervisores e gestores realizam constantemente ajustamentos para responder às condições reais das operações. Estas adaptações podem estar relacionadas com disponibilidade de recursos, limitações de tempo, condições dos equipamentos, exigências operacionais ou situações imprevistas. Na maioria das situações, estas adaptações contribuem para que o sistema continue a funcionar de forma adequada.

Hollnagel (2012) propõe que a variabilidade do desempenho não deve ser interpretada apenas como uma fonte de erro ou falha. Pelo contrário, trata-se de uma característica natural dos sistemas sociotécnicos complexos. Este entendimento é retomado por Kaya et al. (2026), que salientam que o desempenho resulta de adaptações contínuas às condições reais de trabalho e que os mesmos mecanismos que normalmente conduzem ao sucesso das operações podem, em determinadas circunstâncias, contribuir para resultados indesejados.

Nos sistemas de transporte urbano, a execução das diferentes funções pode variar em função das condições em que são realizadas. Fatores como limitações de recursos, alterações operacionais, estado dos equipamentos ou exigências do contexto de trabalho podem influenciar processos de funcionamento, manutenção, verificação das condições do sistema e supervisão organizacional. Estas adaptações, embora frequentemente necessárias para assegurar a continuidade do serviço, podem produzir resultados distintos e contribuir para a propagação de efeitos ao longo do sistema.

De acordo com Hollnagel (2012), os acidentes em sistemas complexos podem surgir quando diferentes variabilidades presentes nas atividades do sistema interagem entre si de forma inesperada. Nesta perspetiva, os eventos críticos não são explicados apenas por uma falha isolada, mas pela combinação de diferentes fatores distribuídos ao longo das operações.

A compreensão da variabilidade de desempenho assume particular relevância na presente investigação, uma vez que permite analisar os acidentes do Ascensor da Glória e do Elétrico de Santa Teresa para além da identificação de falhas específicas. A análise procura compreender de que forma diferentes condições técnicas, humanas, organizacionais e operacionais influenciaram o desempenho das funções envolvidas nos sistemas estudados.

2.4 O FRAM (FUNCTIONAL RESONANCE ANALYSIS METHOD)

O *Functional Resonance Analysis Method* (FRAM), desenvolvido por Erik Hollnagel, consiste numa metodologia de análise sistêmica e não linear utilizada para compreender o funcionamento de sistemas sociotécnicos complexos. Segundo Hollnagel (2012), o método analisa os sistemas a partir das suas funções e das interações existentes entre elas, considerando as adaptações e a variabilidade do desempenho durante o funcionamento quotidiano das operações. Esta perspetiva tem sido reforçada por estudos recentes, que evidenciam a consolidação do FRAM como uma abordagem amplamente utilizada para compreender sistemas complexos, apoiar investigações de acidentes, analisar o trabalho real e promover melhorias organizacionais (Sujan et al., 2026)

O método encontra-se alinhado com os princípios da Engenharia de Resiliência e do paradigma Safety-II, procurando compreender o funcionamento real dos sistemas e as interações existentes entre as suas funções. Nesta perspetiva, os acidentes são analisados como fenómenos emergentes resultantes da combinação de múltiplos fatores distribuídos ao longo do sistema.

Diferentemente dos modelos lineares tradicionais de análise de acidentes, o FRAM não procura identificar apenas uma sequência direta de causas e consequências. O método parte do princípio de que os acidentes podem emergir da combinação de pequenas variações distribuídas em diferentes partes do sistema. Segundo Hollnagel (2012), o desempenho das funções nunca ocorre exatamente da mesma forma, existindo sempre algum grau de adaptação relacionado com condições operacionais, limitações de recursos, disponibilidade de tempo, supervisão e exigências do contexto de trabalho. Estudos recentes demonstram que o FRAM continua a ser amplamente aplicado na modelação de sistemas sociotécnicos complexos e na análise das interações entre fatores humanos, organizacionais e tecnológicos em diferentes setores industriais (Peng, Zhen & Huang, 2023).

No método FRAM, cada função é descrita através de seis aspetos — Input, Output, Precondition, Resource, Control e Time — que permitem representar as condições necessárias para a sua realização, bem como os acoplamentos e as relações de dependência existentes entre as diferentes funções do sistema (Hollnagel, 2012; Peng, Zhen & Huang, 2023).

- Input (Entrada): elemento que inicia ou desencadeia a execução da função;
- Output (Saída): resultado produzido pela função após a sua execução;
- Precondition (Pré-condição): condição que deve estar presente para que a função possa ocorrer;
- Resource (Recurso): meios necessários para a realização da função, como equipamentos, informações ou recursos humanos;
- Control (Controlo): mecanismos que orientam, regulam ou supervisionam a execução da função;
- Time (Tempo): restrições ou requisitos temporais associados à realização da função.

Estes seis aspetos permitem compreender de que forma as funções se relacionam entre si através dos seus acoplamentos. Assim, o resultado produzido por uma função pode influenciar diretamente as condições necessárias para a execução de outras funções, contribuindo para o comportamento global do sistema.

Um dos conceitos centrais do FRAM é a ressonância funcional, entendida como o fenómeno em que a variabilidade do desempenho de diferentes funções se propaga através dos seus acoplamentos, podendo amplificar os seus efeitos e contribuir para o surgimento de resultados inesperados. Nesta perspetiva, os acidentes não são interpretados como consequência de uma única falha isolada, mas como fenómenos emergentes resultantes da combinação de múltiplas interações distribuídas ao longo do sistema (Hollnagel, 2012; Peng, Zhen & Huang, 2023).

O método FRAM tem sido aplicado em diversos setores, incluindo aviação, saúde, energia, indústria petroquímica e sistemas de transporte, demonstrando capacidade para analisar sistemas caracterizados por elevados níveis de interdependência e variabilidade. A sua aplicação permite compreender não apenas as falhas observadas, mas também o funcionamento normal das operações e as adaptações realizadas para garantir a continuidade das atividades.

Na presente investigação, os princípios do FRAM são utilizados para modelar os acidentes do Ascensor da Glória e do Elétrico de Santa Teresa. Através da identificação das funções, dos acoplamentos funcionais e das relações existentes entre elas, procura-se compreender de que forma as variabilidades presentes no funcionamento dos sistemas contribuíram para a ocorrência dos acidentes analisados.

2.5 TRANSPORTES URBANOS SOBRE CARRIS E SEGURANÇA OPERACIONAL

Os sistemas de transporte urbano sobre trilhos desempenham um papel importante na mobilidade das cidades, contribuindo para o deslocamento de pessoas, para a integração entre diferentes áreas urbanas e para o desenvolvimento das atividades económicas e sociais. Entre estes sistemas destacam-se os bondes, elétricos e ascensores, que, para além da sua função de transporte, possuem frequentemente relevância histórica, cultural e patrimonial.

Segundo Pires (2012), os sistemas de bondes tiveram um papel significativo na modernização das cidades e na expansão das redes urbanas, influenciando a organização espacial e o crescimento dos centros urbanos. Em diversas cidades, estes sistemas tornaram-se elementos marcantes da identidade local, mantendo-se em operação mesmo após profundas transformações nos modelos de mobilidade urbana.

A operação destes sistemas resulta da articulação de diversas atividades que contribuem para o seu funcionamento. A segurança depende da forma como essas atividades são realizadas e coordenadas no contexto real de trabalho. Pequenas variabilidades no seu desempenho podem propagar-se pelo sistema e influenciar o seu comportamento global, comprometendo as condições de segurança operacional. De acordo com Hollnagel (2012), a variabilidade está presente nas atividades realizadas em sistemas sociotécnicos complexos e pode produzir efeitos que se propagam através das interações existentes entre as diferentes funções do sistema (Peng, Zhen & Huang, 2023).

Nos sistemas históricos de transporte urbano, os desafios de segurança podem ser ainda mais complexos. A necessidade de preservar equipamentos, infraestruturas e características originais frequentemente exige soluções que conciliem a conservação patrimonial com os requisitos atuais de segurança, fiabilidade e desempenho operacional.

Além dos aspetos técnicos, a segurança operacional destes sistemas depende também de fatores relacionados com a gestão dos recursos disponíveis, planeamento das atividades de manutenção, controlo operacional e capacidade de resposta perante condições imprevistas. Desta forma, a segurança não está associada apenas ao estado físico dos equipamentos, mas também ao modo como diferentes atividades são coordenadas ao longo do funcionamento do sistema. Segundo Hollnagel (2014), o desempenho seguro resulta da capacidade do sistema para ajustar o seu funcionamento às condições reais de operação, através da coordenação e adaptação contínua das suas funções, princípio igualmente evidenciado em estudos recentes sobre Engenharia de Resiliência (Tierra-Arévalo et al., 2024).

Considerando estas características, os sistemas de transporte urbano sobre trilhos podem ser compreendidos como sistemas sociotécnicos complexos, constituídos por múltiplas funções interdependentes. Nestes sistemas, o desempenho global resulta da interação entre fatores técnicos, humanos e organizacionais, sendo influenciado pelas adaptações realizadas pelos diferentes atores envolvidos nas atividades operacionais e organizacionais perante as condições reais de trabalho (Hollnagel, 2012; Peng, Zhen & Huang, 2023).

Neste contexto, torna-se relevante a utilização de uma abordagem que permita compreender como as relações entre essas funções influenciam a dinâmica de funcionamento do sistema e contribuem para a ocorrência de acidentes.

2.6 APLICAÇÃO DA ANÁLISE SISTÉMICA E NÃO-LINEAR AOS ACIDENTES EM TRANSPORTES URBANOS

A análise de acidentes em sistemas de transporte urbano exige uma compreensão abrangente das interações existentes entre diferentes elementos do sistema. Em sistemas sociotécnicos complexos, os eventos críticos raramente resultam de uma única falha isolada, sendo frequentemente consequência da combinação de diversos fatores que interagem ao longo do tempo.

Segundo Hollnagel (2012), as abordagens lineares tradicionais apresentam limitações quando aplicadas à análise de sistemas complexos, uma vez que tendem a representar os acidentes como sequências previsíveis de causas e consequências. Contudo, esta perspetiva nem sempre consegue explicar de forma satisfatória como diferentes atividades se influenciam mutuamente e contribuem para o funcionamento real das operações (Tierra-Arévalo et al., 2024).

A perspetiva sistémica e não-linear procura compreender os acidentes como fenómenos emergentes resultantes das interações entre diferentes funções do sistema. Nesta abordagem, o foco deixa de estar exclusivamente na identificação de uma causa principal, passando a considerar também as adaptações realizadas durante as operações, as condições organizacionais existentes e as interações que influenciam o desempenho global do sistema.

Segundo Hollnagel (2014), o funcionamento quotidiano das operações envolve naturalmente diferentes formas de adaptação relacionadas com recursos disponíveis, condições de trabalho, supervisão, tempo e exigências operacionais. Estas adaptações normalmente contribuem para o funcionamento do sistema, mas determinadas combinações podem influenciar o desenvolvimento de resultados inesperados.

Segundo França et al. (2023), a análise sistémica permite compreender os acidentes para além da identificação de falhas individuais, considerando as relações existentes entre diferentes elementos do sistema sociotécnico. Esta abordagem torna-se particularmente relevante em sistemas de transporte urbano, nos quais atividades de operação, manutenção, supervisão técnica e gestão organizacional se encontram fortemente interligadas.

Neste contexto, os acidentes do Ascensor da Glória e do Elétrico de Santa Teresa constituem exemplos relevantes para aplicação de abordagens sistémicas e não-lineares. Ambos os casos envolvem sistemas históricos de transporte urbano caracterizados pela interação entre fatores técnicos, humanos, organizacionais e operacionais, exigindo uma análise que ultrapasse explicações baseadas exclusivamente em falhas isoladas.

Desta forma, a utilização do método FRAM apresenta-se como uma ferramenta adequada para analisar os acidentes estudados, permitindo representar as funções do sistema, os seus acoplamentos e as interações existentes entre diferentes atividades. A aplicação desta abordagem procura contribuir para uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos no desenvolvimento dos acidentes e para a identificação de aspetos relevantes para a gestão da segurança em sistemas de transporte urbano.

2.7 EVOLUÇÃO RECENTE DA METODOLOGIA FRAM

2.7.1 Evolução Histórica e Consolidação do Fram

Desde a sua introdução por Hollnagel (2004) e posterior consolidação teórica nas obras *FRAM: The Functional Resonance Analysis Method – Modelling Complex Socio-technical Systems* (2012) e *Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management* (2014), o Functional Resonance Analysis Method (FRAM) tem vindo a afirmar-se como uma das principais abordagens sistémicas para a análise de sistemas sociotécnicos complexos.

A proposta inicial do método surgiu da necessidade de ultrapassar as limitações das abordagens lineares tradicionais de investigação de acidentes, que tendem a explicar os eventos adversos através de relações simples de causa e efeito. Em oposição a esta perspetiva, o FRAM parte do princípio de que os sistemas sociotécnicos apresentam um comportamento dinâmico, no qual o desempenho quotidiano resulta da interação contínua entre múltiplas funções, cuja variabilidade pode propagar-se pelo sistema e originar tanto resultados bem-sucedidos como eventos indesejáveis. A crescente adoção dos princípios da Engenharia da Resiliência contribuiu de forma decisiva para a consolidação do FRAM enquanto instrumento de análise. Neste enquadramento, a segurança deixa de ser entendida apenas como a prevenção da ocorrência de falhas, passando igualmente a valorizar a capacidade dos sistemas para se adaptarem às condições reais de funcionamento e manterem um desempenho eficaz perante a variabilidade inerente às operações.

Assim, o FRAM consolidou-se como uma metodologia particularmente adequada para compreender a forma como as adaptações realizadas pelos diferentes intervenientes influenciam o comportamento global dos sistemas sociotécnicos, permitindo analisar não apenas as situações de insucesso, mas também os mecanismos que sustentam o sucesso operacional.

Ao longo das duas últimas décadas, verifica-se um crescimento expressivo da produção científica dedicada ao FRAM. Inicialmente concentradas em trabalhos de natureza conceptual e em estudos aplicados ao setor da aviação, as investigações passaram progressivamente a abranger uma diversidade de contextos operacionais, acompanhando o reconhecimento da utilidade do método na análise de sistemas caracterizados por elevada complexidade e forte interação entre componentes técnicos, humanos e organizacionais. Este crescimento reflete não apenas o aumento do número de publicações, mas também a maturidade alcançada pelo método, evidenciada pelo desenvolvimento de aplicações em diferentes domínios, pela criação de novas linhas de investigação e pela constituição de uma comunidade científica internacional dedicada ao seu aperfeiçoamento.

Neste contexto, assume particular relevância a revisão sistemática desenvolvida por Patriarca et al. (2020), considerada um marco na evolução da literatura sobre o FRAM. Através da análise de um vasto conjunto de publicações internacionais, os autores identificaram a evolução histórica do método, mapearam as principais áreas de aplicação, caracterizaram os diferentes tipos de utilização e evidenciaram as tendências emergentes da investigação. Para além de sintetizar o estado da arte até ao momento da sua publicação, este estudo demonstrou que o FRAM deixou de ser uma metodologia aplicada apenas a casos isolados, passando a constituir uma referência consolidada na investigação sobre sistemas sociotécnicos complexos. A revisão permitiu igualmente evidenciar o crescimento contínuo da produção científica, bem como a diversificação das aplicações e das abordagens metodológicas desenvolvidas a partir da proposta original de Hollnagel.

Outro aspeto relevante destacado por Patriarca et al. (2020) diz respeito à consolidação de uma comunidade internacional de investigadores dedicada ao desenvolvimento do FRAM. Desde as primeiras reuniões científicas promovidas em torno da metodologia, observou-se um aumento significativo da colaboração entre universidades e centros de investigação de diferentes países, favorecendo a troca de experiências e o aperfeiçoamento contínuo do método. A evolução desta rede de colaboração científica contribuiu para a disseminação do FRAM em diferentes áreas do conhecimento, impulsionando o desenvolvimento de aplicações práticas, revisões sistemáticas e propostas de integração com outras metodologias de análise de segurança e de gestão do risco.

Nos anos mais recentes, esta evolução manteve-se de forma consistente. Estudos publicados entre 2024 e 2026 demonstram que o interesse pelo FRAM continua a crescer, tanto do ponto de vista das aplicações práticas como da investigação metodológica. Revisões recentes evidenciam a expansão da utilização do método em novos setores industriais, enquanto outras investigações exploram possibilidades de integração com diferentes técnicas de análise, procurando aumentar o seu potencial de apoio à compreensão da variabilidade funcional e à gestão da segurança em sistemas cada vez mais complexos. Apesar destas evoluções, permanece inalterado o princípio fundamental proposto por Hollnagel: compreender a segurança a partir do funcionamento normal do sistema e da forma como a variabilidade das funções pode propagar-se através das suas interações.

Deste modo, a evolução histórica do FRAM demonstra um processo contínuo de amadurecimento científico. O método evoluiu de uma abordagem inovadora, centrada na Engenharia de Resiliência, para uma metodologia amplamente reconhecida e aplicada internacionalmente na análise de sistemas sociotécnicos complexos. Paralelamente ao aumento do número de estudos publicados, verificou-se uma diversificação dos domínios de aplicação, um fortalecimento da comunidade científica dedicada ao método e o desenvolvimento de novas linhas de investigação que procuram ampliar as suas possibilidades analíticas, preservando, contudo, os princípios conceptuais estabelecidos por Hollnagel. Esses desenvolvimentos constituem a base para compreender a evolução recente do FRAM, cuja expansão para diferentes setores e contextos operacionais será abordada na secção seguinte.

2.7.2 Evolução Histórica e Consolidação do Fram

Desde a sua proposta inicial, o Functional Resonance Analysis Method (FRAM) tem vindo a ser aplicado em um número crescente de domínios, evidenciando a sua versatilidade na análise de sistemas sociotécnicos complexos. Embora os primeiros estudos estivessem concentrados em setores considerados de elevado risco, como a aviação, a indústria nuclear e o setor petrolífero, a metodologia passou a ser adotada em diferentes contextos operacionais, acompanhando a necessidade de compreender como a interação entre funções influencia o desempenho global dos sistemas (Patriarca et al., 2020).

Esse processo de expansão demonstra que o FRAM pode ser utilizado em ambientes caracterizados por elevada complexidade, nos quais os resultados dependem não apenas do desempenho individual dos componentes, mas sobretudo da forma como pessoas, tecnologias,

procedimentos e fatores organizacionais interagem continuamente. Nessa perspectiva, o método tem contribuído para a compreensão dos mecanismos que favorecem tanto o sucesso operacional como a ocorrência de eventos indesejáveis.

Na área dos transportes, o FRAM tem sido aplicado na análise de sistemas ferroviários, metroferroviários, marítimos e aeronáuticos. Esses estudos procuram identificar de que forma a variabilidade das funções pode propagar-se ao longo do sistema, permitindo compreender situações que dificilmente seriam explicadas por modelos lineares de causalidade. Em especial, as aplicações em sistemas ferroviários têm demonstrado a utilidade da metodologia para analisar a interação entre fatores técnicos, humanos e organizacionais envolvidos na operação e manutenção, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias preventivas mais eficazes (Li & Huang, 2025).

O setor da saúde também representa uma das áreas em que o FRAM tem sido amplamente utilizado. Nesse contexto, a metodologia tem sido empregada para compreender processos assistenciais complexos, fluxos de atendimento, encaminhamento de pacientes e funcionamento de serviços hospitalares. Em vez de procurar identificar apenas falhas individuais, os estudos analisam como as adaptações realizadas diariamente pelos profissionais influenciam o desempenho do sistema e a capacidade de resposta perante diferentes condições operacionais (Bruzi et al., 2025).

A construção civil constitui outro domínio em que a utilização do FRAM tem crescido significativamente. A revisão realizada por Tierra-Arévalo et al. (2024) evidencia que a metodologia tem sido empregada para analisar processos construtivos, gestão da segurança, coordenação entre equipes e integração de diferentes ferramentas de resiliência. Os autores salientam que a flexibilidade do método permite representar a variabilidade funcional presente nas atividades de construção, favorecendo uma compreensão mais abrangente das interações existentes entre os diversos intervenientes do sistema.

Além desses setores, estudos recentes demonstram a utilização do FRAM em processos industriais, operações offshore, manufatura, transporte marítimo e aviação. Em todos esses contextos observa-se um objetivo comum: compreender como pequenas variações no desempenho normal das funções podem interagir e produzir consequências relevantes para a segurança e para o funcionamento do sistema como um todo. Essa diversidade de aplicações

reforça o caráter transversal da metodologia e evidencia que os seus princípios podem ser adaptados a diferentes realidades operacionais, independentemente do setor analisado.

A crescente disseminação do FRAM também tem incentivado o desenvolvimento de aplicações voltadas para o apoio à tomada de decisão e à gestão da segurança organizacional. Mais do que reconstruir acidentes ocorridos, a metodologia tem sido utilizada para identificar condições degradadas, compreender mecanismos de adaptação operacional e apoiar a implementação de melhorias capazes de fortalecer a resiliência dos sistemas sociotécnicos.

Dessa forma, verifica-se que a expansão das áreas de aplicação do FRAM reflete a consolidação da metodologia como uma ferramenta de análise sistêmica, capaz de representar a complexidade das interações presentes em diferentes organizações. Esse crescimento demonstra que o método ultrapassou o contexto em que foi inicialmente desenvolvido, tornando-se uma abordagem amplamente reconhecida para o estudo da variabilidade funcional em sistemas complexos.

2.7.3 Extensões Metodológicas e Integração com outras Abordagens

À medida que o FRAM passou a ser aplicado em diferentes domínios, surgiram propostas destinadas a ampliar as suas possibilidades de utilização e a responder a algumas limitações identificadas na aplicação da metodologia original. Embora o modelo desenvolvido por Hollnagel permaneça essencialmente qualitativo, diversos investigadores têm procurado desenvolver procedimentos complementares que permitam aprofundar a análise da variabilidade funcional, apoiar a tomada de decisão e integrar diferentes fontes de informação.

Uma das principais linhas de desenvolvimento consiste na integração do FRAM com outras metodologias de análise de risco e de apoio à decisão. Essa tendência procura combinar a capacidade do FRAM para representar sistemas sociotécnicos complexos com ferramentas que possibilitam estruturar prioridades, comparar cenários ou incorporar elementos quantitativos na avaliação dos processos analisados.

Entre as primeiras iniciativas nesse sentido destacam-se os estudos desenvolvidos por França et al. (2019; 2020), que propõem a integração do FRAM com o Analytic Hierarchy Process (AHP). Nessa abordagem, o FRAM continua a desempenhar o papel de representar as funções do sistema e as respetivas interações, enquanto o AHP é utilizado para apoiar a priorização dos fatores humanos e organizacionais identificados durante a análise. A combinação das duas

metodologias permite estabelecer critérios de comparação entre diferentes fatores que influenciam o desempenho do sistema, constituindo um apoio adicional ao processo de decisão, sem alterar os princípios fundamentais do FRAM.

Mais recentemente, outras propostas passaram a incorporar métodos quantitativos destinados a complementar a análise qualitativa da metodologia original. Entre essas abordagens encontram-se modelos baseados em lógica difusa (Fuzzy Logic), redes Bayesianas, simulações de Monte Carlo, teoria dos grafos e técnicas multicritério de apoio à decisão. De acordo com dos Santos et al. (2025), essas integrações procuram reduzir algumas das dificuldades associadas à interpretação da variabilidade funcional, permitindo representar diferentes níveis de incerteza e explorar cenários alternativos de propagação da variabilidade em sistemas complexos.

No setor ferroviário, Li e Huang (2025) propuseram uma versão aprimorada do FRAM com o objetivo de fortalecer a análise da emergência do risco em sistemas ferroviários de alta velocidade. Os autores mantêm a estrutura conceptual da metodologia desenvolvida por Hollnagel, mas acrescentam mecanismos que permitem representar de forma mais detalhada a propagação da variabilidade entre funções e identificar pontos críticos suscetíveis de intervenção preventiva. Essa proposta ilustra a evolução contínua do método, procurando adaptar a sua aplicação às necessidades específicas de sistemas caracterizados por elevada complexidade operacional.

Apesar dessas contribuições, verifica-se que as diferentes extensões metodológicas não substituem o modelo original do FRAM. Pelo contrário, procuram complementar a sua capacidade analítica mediante a incorporação de ferramentas que respondem a objetivos específicos de investigação. Em todas essas propostas permanecem os princípios fundamentais estabelecidos por Hollnagel, nomeadamente a representação funcional do sistema, a variabilidade do desempenho, os acoplamentos entre funções e a possibilidade de ocorrência da ressonância funcional.

Importa igualmente salientar que a adoção dessas extensões depende da natureza do problema em estudo, da disponibilidade de informação e dos objetivos definidos pelo investigador. Em muitos casos, a utilização exclusiva do FRAM clássico continua a revelar-se suficiente para compreender o comportamento de sistemas sociotécnicos complexos, sobretudo quando o objetivo consiste em analisar a interação entre funções e compreender como determinadas condições operacionais podem favorecer a propagação da variabilidade ao longo do sistema.

No âmbito da presente dissertação, optou-se pela utilização da versão clássica do FRAM proposta por Hollnagel (2012, 2014). Esta opção decorre do facto de o objetivo principal consistir em comparar dois acidentes de transporte de passageiros sob uma perspetiva sistémica, privilegiando a identificação das interações funcionais, da variabilidade do desempenho e dos mecanismos que conduziram à emergência dos acidentes. Assim, embora as extensões metodológicas representem avanços relevantes na evolução do FRAM, a abordagem original mostrou-se plenamente adequada para responder às questões de investigação formuladas neste estudo.

2.7.4 Tendências Recentes da Investigação

O crescente interesse pelo FRAM tem impulsionado o desenvolvimento de novas linhas de investigação, refletindo a consolidação da metodologia como uma das principais abordagens para a análise de sistemas sociotécnicos complexos. Os estudos mais recentes demonstram que a investigação já não se limita à aplicação do método em diferentes setores, mas procura aprofundar a compreensão da variabilidade funcional, aperfeiçoar os modelos de representação das interações entre funções e apoiar a gestão da segurança numa perspetiva cada vez mais preventiva.

Uma das tendências observadas consiste na ampliação do número de setores que recorrem ao FRAM como ferramenta de análise. Para além das áreas tradicionalmente associadas à segurança, como a aviação e a indústria offshore, a metodologia tem vindo a ser utilizada em sistemas ferroviários, operações marítimas, processos industriais, manufatura e serviços de saúde. Esta diversidade evidencia que os princípios fundamentais do FRAM podem ser adaptados a diferentes contextos organizacionais, preservando a sua capacidade de representar a complexidade das interações presentes em sistemas sociotécnicos.

No domínio marítimo, Ümitli, Ceylan e Ercetin (2026) utilizaram o FRAM para analisar um incêndio ocorrido num navio-tanque destinado ao transporte de produtos químicos. A investigação demonstrou que o acidente resultou da interação entre múltiplas funções operacionais e organizacionais, evidenciando que pequenas variações no desempenho podem propagar-se através do sistema e contribuir para a emergência de eventos críticos. Os autores destacam que a abordagem sistémica permitiu identificar oportunidades de melhoria que dificilmente seriam evidenciadas por métodos centrados exclusivamente na procura de causas isoladas.

Na área da aviação, Kaya et al. (2026) recorreram ao FRAM para estudar aproximações instáveis durante procedimentos de aterragem. Os resultados mostraram que o desempenho da operação depende da interação contínua entre pilotos, controlo de tráfego aéreo, condições meteorológicas, procedimentos operacionais e fatores organizacionais. Em vez de atribuir o evento a uma única falha, a metodologia possibilitou compreender como diferentes adaptações realizadas durante a operação podem influenciar o comportamento global do sistema.

Outro campo que tem despertado crescente interesse é a análise da variabilidade do desempenho humano em ambientes industriais. Yasue, Sato e Sawaragi (2026) utilizaram o FRAM para identificar padrões de desempenho dos trabalhadores em atividades de manufatura, demonstrando que as adaptações realizadas pelos operadores constituem uma parte natural do funcionamento do sistema. Os autores argumentam que compreender essas adaptações permite identificar oportunidades de aprendizagem organizacional e desenvolver estratégias mais eficazes para fortalecer a segurança e a resiliência operacional.

Em conjunto, esses estudos evidenciam uma mudança gradual na forma como a segurança é analisada. Em vez de concentrar os esforços apenas na investigação de acidentes já ocorridos, a investigação recente procura compreender como os sistemas operam diariamente, como os profissionais adaptam o seu desempenho perante diferentes condições de trabalho e de que forma essas adaptações podem contribuir tanto para o sucesso operacional como para a ocorrência de eventos indesejáveis. Esta perspetiva está alinhada com os princípios da Engenharia da Resiliência e da abordagem Safety-II, que valorizam o estudo do funcionamento normal dos sistemas como base para a melhoria contínua da segurança (Hollnagel, 2014).

Paralelamente, observa-se um interesse crescente na utilização do FRAM como instrumento de apoio à gestão organizacional. A metodologia tem sido empregada para identificar condições degradadas, apoiar processos de tomada de decisão, avaliar alterações organizacionais e contribuir para o desenvolvimento de sistemas mais resilientes. Dessa forma, o FRAM deixa de ser apenas uma ferramenta de investigação de acidentes e passa a assumir um papel relevante na prevenção, no planeamento e na gestão da segurança em organizações complexas.

A evolução observada nos últimos anos demonstra que o FRAM permanece em constante desenvolvimento, acompanhando as transformações dos sistemas sociotécnicos contemporâneos. As novas aplicações e os aperfeiçoamentos metodológicos reforçam a atualidade da abordagem proposta por Hollnagel, sem alterar os seus princípios fundamentais.

Assim, a investigação recente confirma que o FRAM continua a constituir uma referência relevante para a análise sistêmica da segurança, fornecendo um enquadramento consistente para compreender as interações funcionais que influenciam o desempenho organizacional em diferentes contextos.

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO ENQUADRAMENTO TEÓRICO

O enquadramento teórico desenvolvido permitiu compreender que os acidentes em sistemas sociotécnicos complexos não podem ser explicados apenas pela ocorrência de falhas isoladas ou pela análise individual dos seus componentes. Nos sistemas de transporte urbano sobre carris, o desempenho e a segurança resultam da interação dinâmica entre fatores técnicos, humanos e organizacionais, cujas relações influenciam continuamente o funcionamento do sistema.

A Engenharia de Resiliência e a perspetiva Safety-II oferecem um enquadramento conceptual que privilegia a compreensão do trabalho tal como é efetivamente realizado, reconhecendo que as adaptações efetuadas pelos diferentes intervenientes fazem parte do funcionamento normal dos sistemas e podem contribuir tanto para o sucesso operacional como para a ocorrência de acidentes (Hollnagel, 2014). Neste contexto, o FRAM apresenta-se como uma metodologia adequada para representar essas interações, permitindo analisar de que forma a variabilidade do desempenho funcional pode propagar-se através dos acoplamentos existentes entre as diferentes funções do sistema (Hollnagel, 2012).

A revisão da literatura demonstrou igualmente que, desde a sua proposta inicial, o FRAM tem vindo a consolidar-se como uma abordagem amplamente utilizada na análise de sistemas sociotécnicos complexos. A evolução da metodologia, a diversificação das suas áreas de aplicação e o desenvolvimento de extensões metodológicas evidenciam a sua relevância científica e a capacidade de responder a diferentes problemas de investigação, mantendo como princípio fundamental a compreensão das interações que caracterizam o funcionamento dos sistemas.

No caso do Ascensor da Glória e do Bondinho de Santa Teresa, as características operacionais, técnicas e organizacionais dos dois sistemas reforçam a pertinência de uma abordagem que considere simultaneamente as atividades de operação, manutenção, supervisão e gestão. Esta perspetiva permite compreender os mecanismos de propagação da variabilidade funcional e identificar as condições que favoreceram a emergência dos acidentes, ultrapassando explicações baseadas exclusivamente na procura de causas individuais.

Assim, o enquadramento teórico apresentado fornece a base conceptual e metodológica que sustenta a construção dos modelos FRAM e a análise comparativa desenvolvida nos capítulos seguintes, permitindo interpretar os acidentes numa perspetiva sistémica, coerente com os princípios da Engenharia de Resiliência e da abordagem Safety-II.

3

CARACTERIZAÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO

3.1 O CASO DO ASCENSOR DA GLÓRIA

O presente caso de estudo refere-se ao acidente ocorrido no Ascensor da Glória, em Lisboa, no dia 3 de setembro de 2025. A análise desenvolvida nesta dissertação baseia-se principalmente nas informações disponibilizadas pelo Relatório Preliminar do GPIAAF. Nas secções seguintes são apresentadas as principais características do sistema, a descrição do acidente e os aspetos considerados mais relevantes para a construção do modelo FRAM.

3.1.1 Caracterização Histórica e Operacional do Ascensor da Glória

O Ascensor da Glória localiza-se na cidade de Lisboa, estabelecendo a ligação entre a Praça dos Restauradores e o Bairro Alto através da Calçada da Glória. Concebido para facilitar a mobilidade entre estas duas zonas da cidade, vencendo o acentuado desnível existente, constitui um dos mais conhecidos sistemas históricos de transporte urbano de Lisboa. Atualmente, encontra-se classificado como monumento nacional e, para além da sua função de transporte urbano, assume também um importante papel patrimonial e turístico, sendo amplamente utilizado por residentes e visitantes. A configuração atual do sistema data de 1914, embora, ao longo da sua história, tenham sido realizadas diversas intervenções de conservação, beneficiação e manutenção. Desde 1926, a exploração do ascensor encontra-se sob responsabilidade da Companhia Carris de Ferro de Lisboa (CCFL) (GPIAAF, 2025). A Carris é a entidade responsável pela exploração da rede de transporte público de superfície de Lisboa, cuja frota inclui autocarros, elétricos, três ascensores e o Elevador de Santa Justa (Carris, 2025).

O percurso possui aproximadamente 260 metros de extensão, vencendo um desnível de cerca de 45 metros, com uma inclinação média próxima de 18%. A velocidade máxima de operação é de aproximadamente 3,2 m/s, permitindo a realização do trajeto em pouco mais de um minuto (GPAAAF, 2025).

O sistema é constituído por duas cabinas que operam de forma interdependente, designadas por cabina 1 e cabina 2. Cada veículo transporta passageiros e dispõe de um guarda-freio responsável pela condução operacional. As cabinas preservam características construtivas históricas, sendo compostas por uma estrutura metálica revestida por elementos em madeira e chapa metálica (GPAAAF, 2025).

A utilização do Ascensor da Glória varia ao longo do dia em função da procura por parte de residentes e visitantes. No momento do acidente, a cabina 1 transportava 27 ocupantes e a cabina 2 transportava 33 ocupantes, valores inferiores à capacidade máxima de 42 passageiros por cabina (GPAAAF, 2025). Estes dados demonstram que, embora a ocupação constitua uma característica operacional relevante, a carga transportada não foi identificada como um fator determinante para a ocorrência do acidente.

O funcionamento do ascensor baseia-se num sistema de equilíbrio entre as duas cabinas através de um cabo de tração/equilíbrio instalado num canal subterrâneo sob a Calçada da Glória (Figura 1). Este cabo estabelece a ligação entre os veículos e passa por um volante de inversão localizado no topo do percurso. Ao contrário da maioria dos funiculares convencionais, o volante não é responsável pela tração das cabinas, razão pela qual o Ascensor da Glória é classificado como um funicular automotor, tipologia considerada pouco comum nos sistemas de transporte por cabo (GPAAAF, 2025).

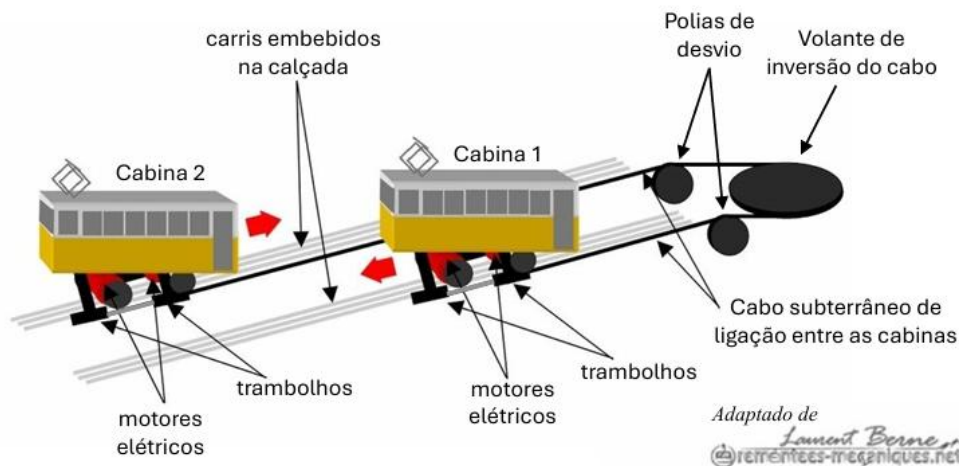


Figura 1– Esquema de funcionamento do Ascensor da Glória, evidenciando as cabinas, o cabo de tração/equilíbrio, os motores elétricos, os trambolhos e o volante de inversão. Fonte: GPIAAF (2025).

Cada cabina dispõe de motores elétricos próprios responsáveis pela produção do esforço de tração necessário ao deslocamento. O movimento do sistema depende da atuação coordenada dos guarda-freios e da interação entre os diferentes componentes mecânicos e elétricos envolvidos na operação. Os motores encontram-se eletricamente ligados em série, fazendo com que o funcionamento do sistema dependa da atuação simultânea das duas cabinas (GPIAAF, 2025).

A ligação do cabo às cabinas é realizada através de dispositivos específicos designados por trambolhos e destorcedores, ilustrados na Figura 2. Estes componentes desempenham funções importantes na fixação do cabo e na acomodação dos movimentos necessários ao funcionamento do sistema. Além disso, o ascensor dispõe de mecanismos de segurança destinados à imobilização das cabinas em situações de emergência (GPIAAF, 2025).

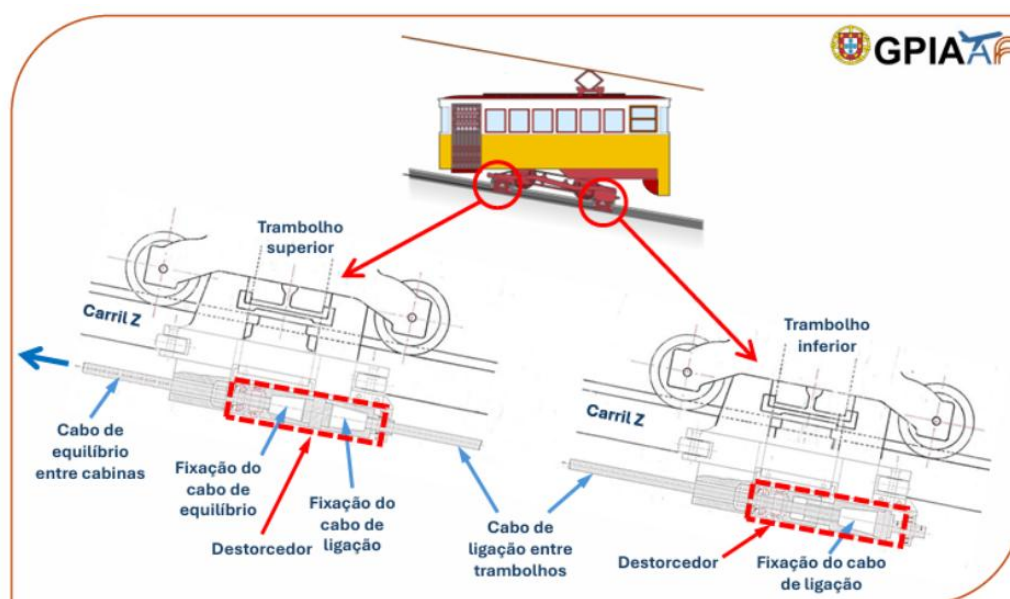


Figura 2– Disposição dos trambolhos e dos destorcedores, evidenciando a fixação do cabo de tração/equilíbrio e do cabo de ligação entre trambolhos. Fonte: GPIAAF (2025).

O sistema principal de frenagem utiliza sapatas acionadas pneumáticamente contra perfis metálicos localizados no canal central da via. Complementarmente, existem sistemas de freio manual acionados pelos guarda-freios durante a operação. O sistema foi concebido para que, em caso de perda da ligação entre as cabinas, ocorra automaticamente a aplicação do freio pneumático e o corte da alimentação elétrica (GPIAAF, 2025).

As características históricas, técnicas e operacionais do Ascensor da Glória evidenciam a complexidade do sistema e a necessidade de articulação entre atividades de operação, manutenção, inspeção e supervisão técnica. Estas características justificam a sua relevância para a presente investigação e para a análise do acidente estudado nesta dissertação.

3.1.2 Sistema de Operação, Manutenção e Segurança do Ascensor da Glória

As informações apresentadas nesta secção baseiam-se no Relatório Preliminar do GPIAAF, que descreve os principais aspetos relacionados com a operação, manutenção e segurança do Ascensor da Glória (GPIAAF, 2025).

O funcionamento do ascensor depende da articulação entre diversos elementos necessários à sua operação. O sistema opera através de duas cabinas ligadas entre si por um cabo de tração/equilíbrio, movimentando-se em sentidos opostos ao longo da Calçada da Glória. Cada cabina possui motores elétricos próprios e necessita da atuação simultânea dos respetivos guarda-freios para que o sistema entre em funcionamento. Desta forma, a operação depende não apenas do correto funcionamento dos equipamentos, mas também da coordenação das atividades envolvidas e dos mecanismos de segurança instalados no sistema (GPAAAF, 2025).

O sistema de tração/equilíbrio assume particular importância para a operação do ascensor. O cabo realiza a ligação entre as duas cabinas, permitindo o equilíbrio das cargas durante o deslocamento. Este cabo percorre um canal subterrâneo ao longo da via, sendo guiado por polias e ligado às cabinas através de dispositivos específicos designados por trambolhos e destorcedores.

Os destorcedores permitem a rotação axial do cabo durante a operação através de mecanismos compostos por rolamentos. Os trambolhos encontram-se associados ao sistema de fixação do cabo às cabinas e ao funcionamento do sistema de frenagem pneumática. O correto funcionamento destes componentes é essencial para a operação segura do ascensor (GPAAAF, 2025).

O sistema principal de frenagem funciona através de sapatas móveis acionadas pneumáticamente contra perfis metálicos localizados na vala central da via. Este sistema atua tanto em condições normais de operação como em situações de emergência. Complementarmente, as cabinas dispõem de sistemas de freio manual acionados diretamente pelos guarda-freios durante a condução operacional.

O sistema foi concebido para responder automaticamente em caso de perda da ligação entre as cabinas. Nessas situações, deveria ocorrer simultaneamente a aplicação do freio pneumático e o corte da alimentação elétrica através de dispositivos instalados no compartimento técnico localizado no topo da calçada (GPAAAF, 2025).

A manutenção constitui outro elemento fundamental para a segurança operacional do ascensor. As atividades desenvolvidas incluíam inspeções periódicas, controlo das condições do cabo, verificação dos sistemas de frenagem, substituição de componentes mecânicos e elétricos e monitorização geral do funcionamento do sistema.

O relatório preliminar refere ainda que parte significativa das atividades de manutenção dependia da experiência prática dos trabalhadores e da transmissão informal de conhecimento entre técnicos mais experientes e trabalhadores mais recentes. Em determinadas situações, os procedimentos realizados no contexto real de trabalho diferiam das descrições formais previstas na documentação técnica (GPAAAF, 2025).

No que respeita ao cabo de tração/equilíbrio, a investigação preliminar identificou aspetos relacionados com a sua conformidade técnica, características estruturais e comportamento durante a utilização operacional. O cabo utilizado apresentava diferenças relativamente às especificações inicialmente previstas para o Ascensor da Glória, incluindo aspetos relacionados com a sua construção, graduação do aço e utilização associada ao sistema de destorcedores.

A investigação identificou igualmente que determinadas alterações observadas durante a utilização do cabo, nomeadamente variações de comportamento mecânico e deformações verificadas ao longo da operação, acabaram por ser interpretadas como condições aceitáveis no contexto das práticas quotidianas de trabalho (GPAAAF, 2025).

Além dos aspetos técnicos, o relatório preliminar evidencia questões relacionadas com supervisão operacional, controlo organizacional e fiscalização das atividades de manutenção. Entre os aspetos analisados pelo GPAAAF destacam-se:

- procedimentos de manutenção dos componentes críticos;
- verificação da execução das atividades;
- critérios de fiscalização;
- formação e experiência dos trabalhadores;
- controlo da qualidade das intervenções realizadas;
- supervisão técnica do sistema.

O funcionamento seguro do Ascensor da Glória dependia da articulação entre diferentes atividades de operação, manutenção, inspeção, supervisão e controlo técnico. Neste sentido, a segurança operacional encontrava-se associada não apenas à integridade física dos equipamentos, mas também às condições em que estas atividades eram realizadas no quotidiano do sistema.

Estas características demonstram a complexidade técnica e operacional do Ascensor da Glória e a diversidade de atividades envolvidas no seu funcionamento.

3.1.3 Caracterização do Acidente do Ascensor da Glória

O acidente do Ascensor da Glória ocorreu no dia 3 de setembro de 2025, pelas 18h03, na Calçada da Glória, em Lisboa, tendo sido classificado pelo Gabinete de Prevenção e Investigação de Acidentes com Aeronaves e de Acidentes Ferroviários (GPIAAF) como um acidente grave de transporte ferroviário. Segundo o relatório preliminar, a ocorrência envolveu o descarrilamento e a subsequente colisão das cabinas na sequência da rotura da ligação do cabo à cabina n.º 1.

De acordo com as informações preliminares disponibilizadas pelo GPIAAF, o acidente ocorreu durante a operação normal do sistema, quando as cabinas se encontravam em circulação ao longo do percurso operacional.

A perda da ligação do cabo provocou alterações súbitas no equilíbrio do sistema, comprometendo o funcionamento operacional do ascensor e desencadeando uma sequência de eventos que culminou no descarrilamento e colisão dos veículos. A sequência geral dos acontecimentos identificada na investigação preliminar encontra-se representada na Figura 3.

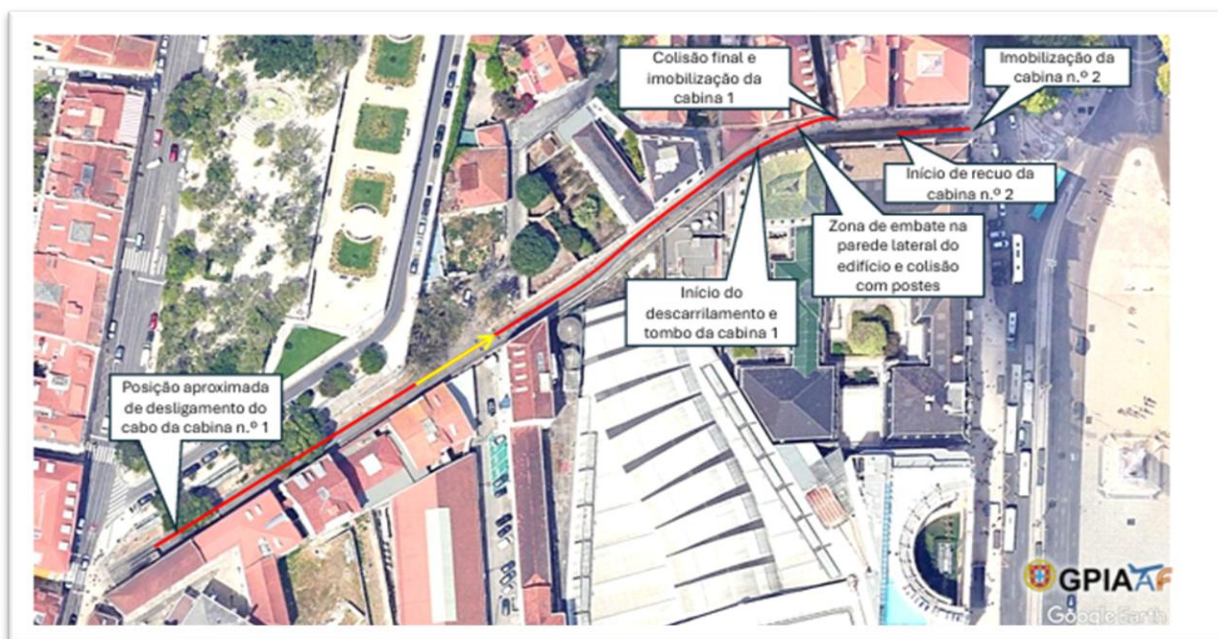


Figura 3 – Sequência dos principais eventos ocorridos durante o acidente do Ascensor da Glória, incluindo a posição aproximada da rotura da ligação do cabo, o descarrilamento, os embates e a imobilização das cabinas. Fonte: GPIAAF (2025).

Segundo o funcionamento previsto do sistema, a perda da ligação entre as cabinas deveria provocar automaticamente a atuação dos mecanismos de segurança, incluindo a aplicação do freio pneumático e o corte da alimentação elétrica.

Contudo, o relatório preliminar indica que a investigação passou a analisar detalhadamente o comportamento dos sistemas de travagem e a eficácia da resposta do sistema perante as condições verificadas durante o acidente.

Após a ocorrência, o GPIAAF iniciou uma investigação de segurança envolvendo diferentes áreas técnicas relacionadas com:

- funcionamento do sistema de frenagem;
- dinâmica do acidente;
- cabo e respetivo sistema de fixação;
- manutenção;
- operação e gestão da segurança;
- enquadramento legal do sistema;

- condições de sobrevivência;
- supervisão técnica.

A investigação preliminar passou igualmente a analisar o mecanismo de rotura do cabo, os procedimentos associados à sua instalação e manutenção, bem como os dispositivos utilizados na fixação às cabinas. Entre os aspetos analisados encontravam-se:

- condições de execução das operações de manutenção;
- controlos de qualidade realizados;
- verificação técnica dos componentes críticos;
- formação e experiência dos trabalhadores envolvidos;
- fiscalização da prestação de serviços;
- procedimentos de inspeção e supervisão operacional.

Segundo o relatório preliminar, a investigação abrangeu não apenas os aspetos relacionados com a rotura da ligação do cabo, mas também questões associadas à manutenção, ao controlo técnico, à supervisão organizacional e ao funcionamento dos sistemas de segurança.

O relatório preliminar refere ainda que foram realizadas entrevistas com trabalhadores, técnicos, responsáveis operacionais, equipas de manutenção e diferentes entidades envolvidas no funcionamento do ascensor. Paralelamente, foram executadas perícias técnicas, ensaios e reconstituições operacionais com o objetivo de compreender o funcionamento do sistema e identificar os fatores relevantes para a investigação do acidente.

À data de publicação do relatório preliminar, a investigação permanecia em curso, encontrando-se ainda em análise diversos aspetos técnicos, operacionais e organizacionais relacionados com a ocorrência.

3.1.4 Principais Constatações Preliminares da Investigação

A investigação preliminar conduzida pelo GPIAAF identificou diversos aspetos considerados relevantes para a compreensão do acidente ocorrido no Ascensor da Glória. As análises desenvolvidas até à data procuraram compreender não apenas a sequência dos acontecimentos, mas também as condições técnicas, operacionais e organizacionais existentes antes da ocorrência.

Entre os principais aspetos analisados encontra-se a rotura da ligação do cabo à cabina n.º 1. Segundo o relatório preliminar, a investigação concentrou-se na análise do mecanismo de rotura, das condições de funcionamento do cabo e dos dispositivos utilizados na sua fixação às cabinas.

Um dos elementos identificados relaciona-se com a conformidade técnica do cabo utilizado no sistema. O relatório refere que o cabo instalado apresentava diferenças relativamente às especificações inicialmente previstas para o Ascensor da Glória, incluindo aspetos relacionados com a sua construção, graduação do aço e compatibilidade com o sistema de destorcedores existente no equipamento.

O GPIAAF refere igualmente que foram identificadas referências técnicas e certificações indicando que o tipo de cabo utilizado não deveria operar associado ao sistema de destorcedor instalado no ascensor. Apesar disso, o equipamento permaneceu em funcionamento nessas condições durante o período anterior ao acidente.

Outro aspeto relevante identificado pela investigação refere-se ao comportamento observado do cabo durante as atividades de manutenção e utilização operacional. Segundo o relatório preliminar, trabalhadores envolvidos nas intervenções de manutenção relataram diferenças no comportamento físico do cabo, incluindo alterações de comprimento, maior flexibilidade e determinadas deformações observadas durante a operação.

A investigação indica ainda que estas alterações eram conhecidas pelos trabalhadores envolvidos nas atividades de manutenção e operação, tendo sido objeto de observação ao longo do período de utilização do cabo.

As análises preliminares identificaram igualmente aspetos relacionados com os procedimentos de manutenção e controlo técnico. De acordo com o GPIAAF, determinadas atividades críticas relacionadas com o cabo e os dispositivos de fixação dependiam fortemente da experiência prática dos trabalhadores e da transmissão informal de conhecimento entre técnicos mais experientes e trabalhadores mais recentes.

No que respeita especificamente aos dispositivos de fixação, a investigação analisou os procedimentos associados às pinhas de fixação e aos destorcedores utilizados no sistema. O relatório preliminar refere ainda limitações relacionadas com os mecanismos de controlo da qualidade e de verificação técnica destas operações de manutenção.

O funcionamento dos sistemas de frenagem constituiu igualmente um dos principais focos da investigação. Segundo o GPIAAF, a análise procurou compreender o comportamento dos mecanismos pneumáticos e manuais de travagem durante o acidente, bem como a capacidade de resposta do sistema após a perda da ligação entre as cabinas. A figura 4 apresenta alguns dos principais componentes do sistema de travagem analisados durante a investigação, nomeadamente a eletroválvula de acionamento do freio automático e as sapatas do freio do trambolho.



Figura 4 – Eletroválvula de acionamento do freio automático (à esquerda) e sapatas de freio do trambolho (à direita), componentes analisados no âmbito da investigação dos sistemas de travagem do Ascensor da Glória. Fonte: GPIAAF (2025).

Além dos aspetos técnicos, a investigação passou também a analisar questões relacionadas com:

- fiscalização das atividades de manutenção;
- supervisão técnica;
- formação e experiência dos trabalhadores;
- procedimentos organizacionais;
- controlo da execução das atividades críticas;
- gestão da segurança operacional.

O relatório preliminar refere ainda que foram realizadas entrevistas com trabalhadores, técnicos, responsáveis operacionais, equipas de manutenção e outras entidades envolvidas no funcionamento do ascensor. Paralelamente, foram efetuadas perícias técnicas, ensaios e reconstituições operacionais com o objetivo de apoiar a investigação e aprofundar a compreensão das circunstâncias associadas ao acidente.

À data de publicação do relatório preliminar, a investigação permanecia em curso, encontrando-se ainda em análise diversos aspetos técnicos, operacionais e organizacionais relacionados com a ocorrência.

3.2 O CASO DO ELÉTRICO DE SANTA TERESA

O presente caso de estudo refere-se ao acidente ocorrido com o Elétrico de Santa Teresa, no Rio de Janeiro, em 2011. A análise apresentada neste capítulo foi desenvolvida com base em informações disponíveis na literatura sobre o acidente, nomeadamente na dissertação de Silva (2020), que reúne um conjunto de elementos relacionados com o funcionamento do sistema e com as circunstâncias que antecederam a ocorrência.

Nas secções seguintes são apresentadas as principais características históricas e operacionais do bonde, bem como a descrição do acidente e os aspetos identificados nas análises realizadas após a ocorrência. Esta contextualização permite compreender melhor as condições em que o acidente ocorreu e constitui a base para a construção do modelo FRAM desenvolvido posteriormente.

3.2.1 Caracterização Histórica e Operacional do Elétrico de Santa Teresa

O sistema de bondes de Santa Teresa constitui um dos meios de transporte mais emblemáticos da cidade do Rio de Janeiro, desempenhando simultaneamente funções de mobilidade urbana e de preservação do património histórico local. Implantado no final do século XIX, o sistema foi concebido para estabelecer a ligação entre o centro da cidade e o bairro de Santa Teresa, respondendo às necessidades de mobilidade da população e contribuindo para a ocupação e expansão urbana da região. Ao longo do tempo, passou igualmente a assumir um importante valor histórico, cultural e patrimonial, tornando-se um elemento marcante da paisagem urbana carioca (Silva, 2020).

A sua importância ultrapassa a dimensão do transporte de passageiros, estando associada ao desenvolvimento urbano do Rio de Janeiro e à identidade cultural do bairro. Ao longo das décadas, os bondes de Santa Teresa tornaram-se um dos símbolos mais reconhecidos da cidade, sendo frequentemente associados à sua memória histórica e ao seu património cultural. À data do acidente analisado nesta dissertação, a exploração do sistema encontrava-se sob responsabilidade da Companhia Estadual de Engenharia de Transportes e Logística

(CENTRAL), empresa pública vinculada ao Governo do Estado do Rio de Janeiro (Silva, 2020). A Figura 5 apresenta um registo histórico do bonde atravessando os Arcos da Lapa, uma das imagens mais representativas deste sistema de transporte.



Figura 5 – Bonde de Santa Teresa atravessando os Arcos da Lapa no início do século XX.

Segundo Pires (2012), os sistemas de bondes tiveram um papel importante no processo de modernização das cidades brasileiras, contribuindo para a expansão urbana, a integração territorial e o desenvolvimento das áreas urbanas. No Rio de Janeiro, a introdução dos bondes elétricos permitiu ampliar a mobilidade da população e influenciou diretamente a organização espacial da cidade.

O bairro de Santa Teresa caracteriza-se por um relevo acentuado, ruas estreitas e um traçado urbano histórico, condições que favoreceram a utilização do bonde como meio de transporte coletivo. Estas características impunham desafios específicos à circulação dos veículos, exigindo elevados níveis de atenção por parte dos operadores durante a condução.

O serviço era realizado por bondes elétricos que circulavam sobre trilhos instalados em vias urbanas partilhadas com outros veículos e peões. O percurso incluía curvas apertadas, declives significativos e zonas de circulação complexa, criando condições operacionais exigentes para a exploração do sistema. De acordo com Silva (2020), estas características constituíam elementos relevantes para compreender o contexto em que ocorreu o acidente analisado nesta dissertação.

Para além da circulação dos veículos, a continuidade do serviço dependia de atividades relacionadas com manutenção, inspeção, fornecimento de energia elétrica, gestão operacional e supervisão técnica. O funcionamento seguro do sistema exigia, assim, a articulação permanente entre recursos técnicos, atividades operacionais e processos de gestão.

Ao longo dos anos, a infraestrutura e os equipamentos foram sujeitos a processos de envelhecimento, frequentemente associados a dificuldades de renovação e conservação. Apesar dessas limitações, os bondes continuaram a desempenhar um papel relevante na mobilidade urbana do bairro. Para a população residente, constituíam um importante meio de transporte quotidiano, enquanto para os turistas representavam um dos principais atrativos históricos e culturais da cidade. Nos anos que antecederam o acidente de 2011, contudo, a redução do número de composições em circulação, associada às dificuldades de manutenção e conservação, favoreceu a ocorrência de situações frequentes de sobrelotação, aumentando as exigências operacionais sobre o sistema (Silva, 2020).

Neste contexto, a continuidade da exploração do sistema encontrava-se associada não apenas às necessidades de mobilidade da população, mas também à preservação de um importante património histórico da cidade, exigindo simultaneamente elevados níveis de segurança e fiabilidade operacional.

3.2.2 Operação, Manutenção e Funcionamento do Sistema

O funcionamento do sistema de bondes de Santa Teresa dependia da articulação entre a operação dos veículos, a manutenção da infraestrutura, o fornecimento de energia elétrica, a supervisão operacional e as condições gerais de conservação do sistema.

No que respeita à operação do sistema, embora os bondes possuíssem uma capacidade de transporte definida, a fiscalização da lotação mostrava-se insuficiente em diversas situações. Antes do acidente de 2011, eram frequentes os relatos de sobrelotação, favorecidos pela redução do número de composições em circulação e pela elevada procura do serviço. No dia do acidente, o bonde n.º 10 transportava cerca de 60 passageiros, aproximadamente 15 acima da sua capacidade, circunstância inicialmente apontada entre os possíveis fatores contribuintes para o acidente (Silva, 2020). Esta situação evidencia que as limitações operacionais do sistema não se restringiam às condições técnicas dos veículos, mas também envolviam o controlo da utilização e da capacidade de transporte.

Tratando-se de um sistema ferroviário urbano histórico implantado numa área de relevo acentuado e circulação urbana complexa, a segurança operacional encontrava-se diretamente associada às atividades de manutenção, inspeção e controlo técnico.

Os bondes operavam diariamente em trajetos caracterizados por curvas fechadas, declives significativos e circulação partilhada com outros veículos e peões. Estas condições exigiam atenção constante dos operadores durante a condução dos veículos, particularmente em situações relacionadas com o controlo da velocidade, travagem e circulação em zonas urbanas densamente ocupadas.

Os bondes eram conduzidos por motorneiros responsáveis pela operação dos veículos ao longo do percurso. Além da condução, a exploração do sistema dependia do funcionamento adequado dos sistemas de travagem, da conservação dos trilhos, do fornecimento de energia elétrica e do acompanhamento das condições operacionais.

Ao longo dos anos, o sistema passou por processos de envelhecimento da infraestrutura e redução de investimentos. Segundo Silva (2020), moradores e utilizadores manifestavam preocupações relacionadas com a manutenção dos veículos, a redução da frota operacional e a degradação das condições gerais do serviço antes do acidente ocorrido em 2011.

A autora refere ainda limitações relacionadas com a conservação dos bondes, a disponibilidade de veículos para operação e as dificuldades associadas à manutenção de uma infraestrutura histórica sujeita a desgaste contínuo.

Outro aspeto frequentemente referido nas fontes consultadas relaciona-se com a superlotação do bonde em determinados períodos operacionais. Segundo Silva (2020), o excesso de passageiros era frequentemente apontado como uma das fragilidades do sistema, constituindo uma preocupação recorrente entre utilizadores e moradores.

Além dos aspetos técnicos, o funcionamento do sistema dependia fortemente da experiência prática dos trabalhadores envolvidos nas atividades de condução e manutenção. Segundo Silva (2020), a degradação progressiva do sistema passou igualmente a ser percebida pelos moradores do bairro, que associavam a redução das condições operacionais à perda gradual da qualidade do serviço e ao aumento das preocupações relacionadas com a segurança operacional.

As informações apresentadas nesta secção permitem compreender as principais características operacionais, técnicas e organizacionais do sistema de bondes de Santa Teresa antes do acidente ocorrido em 2011, tema abordado nas secções seguintes.

3.2.3 Caracterização do Acidente do Elétrico de Santa Teresa

A ocorrência envolvendo o bonde n.º 10 de Santa Teresa constituiu um dos acontecimentos mais marcantes da história recente do transporte urbano do bairro. O evento provocou forte repercussão nacional devido ao elevado número de vítimas e às discussões suscitadas sobre as condições de operação, manutenção e segurança do tradicional sistema de bondes do Rio de Janeiro.

De acordo com Silva (2020), o acidente ocorreu em 27 de agosto de 2011, quando o veículo se encontrava em circulação regular pelo bairro de Santa Teresa. Durante o percurso, o bonde perdeu o controlo e veio posteriormente a descarrilar numa curva da Rua Joaquim Murtinho, colidindo contra um muro e um poste. A ocorrência resultou na morte de passageiros e deixou dezenas de feridos, provocando igualmente danos significativos no veículo e em elementos da infraestrutura envolvente. A Figura 6 apresenta o estado do bonde n.º 10 após a ocorrência.



Figura 6 – Bonde n.º 10 após o acidente ocorrido na Rua Joaquim Murtinho, Rio de Janeiro, em 27 de agosto de 2011. Fonte: Felipe O. Neil – O Dia/VEJA, citado por Silva (2020).

Segundo Silva (2020), os impactos do evento ultrapassaram as consequências diretamente associadas às vítimas, afetando também moradores, trabalhadores e utilizadores habituais do sistema. A autora destaca que a ocorrência assumiu particular relevância devido à forte ligação histórica, cultural e social existente entre os bondes e o bairro de Santa Teresa.

As análises realizadas após o acidente indicaram que o veículo transportava um número elevado de passageiros no momento da ocorrência. A questão da superlotação passou a integrar os debates relacionados com as condições de operação dos bondes e com a segurança do serviço prestado.

Além das consequências humanas, a ocorrência teve impacto significativo na mobilidade local. Após o acidente, as atividades dos bondes foram suspensas, provocando alterações nas deslocamentos quotidianos dos moradores e modificações na dinâmica de circulação do bairro.

Silva (2020) refere que a interrupção das operações gerou forte mobilização social, particularmente devido à importância histórica e patrimonial do sistema. A autora destaca ainda que o acontecimento intensificou as discussões relacionadas com a conservação da infraestrutura, a manutenção dos veículos e a responsabilidade pela segurança das operações.

Segundo Silva (2020), problemas relacionados com degradação da infraestrutura, dificuldades de manutenção e limitações operacionais já eram objeto de preocupação antes de 2011. Questões associadas à superlotação, à redução da frota disponível e às condições gerais de funcionamento dos bondes passaram igualmente a receber maior atenção após a ocorrência. O acontecimento marcou profundamente a trajetória do sistema de bondes de Santa Teresa, desencadeando debates sobre a continuidade do serviço, a preservação do património histórico e as condições necessárias para garantir a sua operação futura.

3.2.4 Principais Fatores Identificados após o Acidente

Após a ocorrência envolvendo o bonde n.º 10, diferentes estudos e análises passaram a examinar de forma mais aprofundada as condições de funcionamento do sistema de bondes de Santa Teresa. Estas análises procuraram compreender não apenas os acontecimentos associados ao acidente, mas também o contexto operacional e organizacional em que o sistema se encontrava inserido.

Segundo Silva (2020), as preocupações relacionadas com o estado de conservação do sistema não surgiram apenas após o acidente. Moradores, utilizadores e trabalhadores já manifestavam anteriormente preocupações associadas ao envelhecimento da infraestrutura, à conservação dos veículos e às dificuldades relacionadas com as atividades de manutenção.

Entre os aspetos frequentemente referidos nas análises realizadas após o acidente encontravam-se as condições de manutenção da frota. Sendo um sistema histórico de transporte urbano, os bondes encontravam-se sujeitos a desgaste acumulado ao longo do tempo, exigindo atividades contínuas de inspeção, reparação e substituição de componentes.

As condições dos sistemas de travagem constituíram igualmente um dos temas mais abordados após a ocorrência. De acordo com Silva (2020), os registos analisados indicavam a existência de intervenções frequentes relacionadas com o sistema de frenagem do bonde envolvido no acidente. A autora refere que o bonde n.º 10 apresentava "problemas crónicos no sistema de frenagem, sendo desproporcional a frequência de reparos realizados" (SILVA, 2020).

Outro aspeto frequentemente mencionado nas análises dizia respeito à ocupação dos veículos. No momento do acidente, o bonde transportava um número elevado de passageiros, situação descrita por diferentes intervenientes como uma condição observada com alguma regularidade durante a operação do sistema.

As análises posteriores ao acidente abordaram também questões relacionadas com a infraestrutura e com as condições gerais de funcionamento do serviço. O desempenho seguro do sistema dependia não apenas das condições dos veículos, mas também da conservação dos trilhos, dos sistemas elétricos e das atividades de inspeção e acompanhamento realizadas ao longo do percurso.

Foram igualmente identificados aspetos relacionados com a supervisão operacional e com a gestão das atividades de manutenção. Conforme descrito por Silva (2020), trabalhadores envolvidos na manutenção relataram a identificação prévia de problemas no veículo e a necessidade de substituição de determinados componentes. Segundo os depoimentos analisados pela autora, "funcionários responsáveis pela manutenção indicaram falhas no bonde, solicitaram peças para troca e após terem realizado o ajuste houve, ainda assim, o acidente" (SILVA, 2020).

As análises realizadas após a ocorrência referiram ainda situações relacionadas com a continuidade da operação do sistema perante limitações associadas à manutenção e à conservação dos equipamentos. Diferentes depoimentos e documentos analisados por Silva (2020) indicavam que algumas destas questões já eram conhecidas antes do acidente.

Em síntese, os estudos desenvolvidos após o acidente identificaram aspetos relacionados com a manutenção dos veículos, os sistemas de travagem, a ocupação dos bondes, as condições da infraestrutura e os mecanismos de supervisão e acompanhamento operacional. Estes elementos contribuíram para uma melhor compreensão do contexto em que o acidente ocorreu e constituem informações relevantes para a construção do modelo FRAM apresentado no Capítulo 4.

4

CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DOS MODELOS FRAM

4.1 MODELO FRAM DO ASCENSOR DA GLÓRIA

Após a caracterização do sistema, do acidente e das principais constatações identificadas na investigação conduzida pelo GPIAAF, procede-se à construção do modelo FRAM do Ascensor da Glória. O objetivo desta etapa consiste em representar as funções consideradas mais relevantes para a compreensão do acidente e analisar de que forma as suas interações contribuíram para o desenvolvimento do evento.

A construção do modelo foi realizada com base nas informações apresentadas no relatório preliminar do GPIAAF, procurando representar os aspetos técnicos, operacionais e organizacionais identificados ao longo da investigação. Nas secções seguintes são apresentadas as funções seleccionadas, os respetivos acoplamentos, o modelo desenvolvido e a análise da ressonância funcional associada ao acidente.

4.1.1 Identificação das funções

A construção do modelo FRAM do Ascensor da Glória teve início com a identificação das funções consideradas mais relevantes para a compreensão do acidente ocorrido em 3 de setembro de 2025. Esta etapa foi desenvolvida com base na análise do relatório preliminar elaborado pelo Gabinete de Prevenção e Investigação de Acidentes com Aeronaves e de Acidentes Ferroviários (GPIAAF, 2025), principal fonte documental utilizada na presente investigação.

De acordo com Hollnagel (2012), a construção de um modelo FRAM pressupõe a identificação das funções relevantes para representar o funcionamento do sistema em análise. Neste contexto, procurou-se identificar as atividades, decisões, condições e mecanismos que, segundo as evidências apresentadas na investigação, contribuíram para o desenvolvimento do acidente e para a evolução das circunstâncias que antecederam a ocorrência.

A identificação das funções foi realizada a partir da análise das informações relacionadas com o sistema de tração/equilíbrio, os procedimentos de manutenção, os sistemas de segurança e os aspetos técnicos e organizacionais evidenciados no relatório do GPIAAF. Foram igualmente consideradas as conclusões preliminares da investigação, os elementos associados à degradação do cabo e os aspetos relacionados com a resposta do sistema perante as condições observadas durante o acidente.

Importa referir que o objetivo do modelo não consistiu em representar exhaustivamente todas as atividades desenvolvidas no funcionamento do Ascensor da Glória. Considerando a complexidade do sistema e a diversidade de processos envolvidos na sua operação quotidiana, optou-se por selecionar apenas as funções consideradas mais relevantes para compreender o desenvolvimento do acidente. Esta opção permitiu construir um modelo focado nos elementos com maior capacidade explicativa para os objetivos da presente investigação.

A seleção das funções procurou ainda assegurar a representação de diferentes dimensões do sistema, incluindo aspetos técnicos, operacionais e organizacionais. Desta forma, o modelo não se limita aos componentes físicos diretamente envolvidos na ocorrência.

As funções identificadas procuram representar diferentes elementos que contribuíram para o desenvolvimento do acidente de influência. Algumas estão diretamente relacionadas com aspetos técnicos associados ao cabo de tração/equilíbrio e aos seus dispositivos de fixação, enquanto outras representam atividades operacionais, práticas de gestão da segurança e mecanismos de acompanhamento técnico identificados ao longo da investigação conduzida pelo GPIAAF (2025).

O processo de identificação foi desenvolvido de forma gradual, permitindo rever e ajustar as funções à medida que a análise documental avançava. Este procedimento contribuiu para garantir a coerência do modelo com as evidências apresentadas no relatório preliminar do GPIAAF e para assegurar que as funções selecionadas representassem adequadamente os elementos considerados mais relevantes para a compreensão do acidente.

Com base neste processo, foram identificadas catorze funções principais que constituem a estrutura do modelo FRAM do Ascensor da Glória. A descrição destas funções e dos principais acoplamentos identificados é apresentada na secção seguinte.

4.1.2 Descrição das Funções e dos Acoplamentos

Embora o Relatório Preliminar do GPIAAF descreva atividades anteriores ao processo de aquisição do cabo, como a definição das especificações técnicas, os procedimentos de aquisição e os critérios de receção e aceitação, estas não foram representadas como funções autónomas no modelo desenvolvido. Considerou-se que essas atividades pertencem a uma etapa organizacional anterior ao limite da modelação definido para este estudo. Assim, o modelo concentrou-se nas funções para as quais a investigação do GPIAAF forneceu evidências suficientes de interação e de influência na propagação da variabilidade até à ocorrência do acidente.

Com base neste processo, foram selecionadas catorze funções consideradas relevantes para representar o desenvolvimento do acidente do Ascensor da Glória. A Tabela 1 apresenta as funções que constituem a estrutura do modelo FRAM desenvolvido para este caso de estudo.

Tabela 1 - Funções Identificadas no Modelo Fram do Ascensor da Glória

Código	Função
F1	Adquirir cabo inadequado
F2	Aceitar inadequadamente cabo não conforme
F3	Ignorar restrição técnica de utilização do cabo
F4	Utilizar cabo incompatível com as especificações do sistema
F5	Executar inadequadamente a fixação da pinha
F6	Executar manutenção insuficiente do sistema
F7	Inspecionar inadequadamente a zona crítica do cabo
F8	Submeter o cabo a esforços contínuos de operação
F9	Agravar a degradação estrutural do cabo
F10	Ativar insuficientemente o sistema de freio
F11	Executar imobilização insuficiente das cabinas
F12	Produzir colisão das cabinas
F13	Falhar na deteção de condições degradadas
F14	Aplicar enquadramento legal e supervisão técnica insuficientes

Fonte: Elaboração própria com base em GPIAAF (2025).

As funções identificadas procuram representar diferentes níveis de influência presentes no acidente. Algumas estão diretamente relacionadas com aspetos técnicos associados ao cabo de tração/equilíbrio e aos seus dispositivos de fixação, enquanto outras representam atividades operacionais, práticas de gestão da segurança e mecanismos de acompanhamento técnico identificados ao longo da investigação conduzida pelo GPIAAF (2025). As funções F1 a F5 representam essencialmente decisões e atividades relacionadas com a seleção, aceitação e utilização do cabo, bem como com os procedimentos associados à sua fixação às cabinas. Estas funções refletem aspetos que a investigação identificou como relevantes para compreender as condições que antecederam a rotura da ligação do cabo à cabina n.º 1.

As funções F6, F7, F13 e F14 estão associadas às atividades de manutenção, inspeção, detecção de condições degradadas e supervisão técnica. O relatório preliminar do GPIAAF evidencia que estes elementos desempenharam um papel importante na capacidade do sistema para identificar, acompanhar e controlar sinais de degradação que se foram desenvolvendo ao longo do tempo.

Por sua vez, as funções F8 e F9 representam os mecanismos associados à utilização continuada do cabo e à progressiva degradação das suas condições estruturais. Estas funções permitem representar a acumulação de efeitos resultantes da operação do sistema ao longo do período que antecedeu o acidente.

Finalmente, as funções F10, F11 e F12 estão relacionadas com a fase final do evento, incluindo a resposta dos sistemas de segurança, a capacidade de imobilização das cabinas e a ocorrência da colisão. Estas funções representam os acontecimentos mais diretamente associados à materialização do acidente.

Os acoplamentos estabelecidos entre as funções foram definidos com base nas evidências apresentadas pelo GPIAAF (2025) e procuram representar as principais relações de influência identificadas na investigação. Entre os acoplamentos mais relevantes encontra-se a ligação entre F1 e F2, uma vez que a aquisição de um cabo inadequado constitui uma condição necessária para a sua posterior aceitação e utilização no sistema. De forma semelhante, a função F2 influencia F3, dado que a aceitação de um componente não conforme cria as condições para que restrições técnicas associadas à sua utilização deixem de ser consideradas na operação.

A sequência formada pelas funções F3, F4 e F5 representa a progressiva integração do cabo nas operações do sistema. A utilização de um cabo incompatível com as especificações previstas influencia diretamente os procedimentos de fixação e as condições de funcionamento dos componentes associados ao sistema de tração/equilíbrio.

As funções relacionadas com manutenção, inspeção e supervisão apresentam igualmente forte influência sobre a evolução do acidente. Neste contexto, F14 atua sobre F6 e F13, uma vez que limitações ao nível da supervisão técnica e do enquadramento organizacional podem influenciar tanto as atividades de manutenção como a capacidade de identificar condições degradadas. Por sua vez, F6 influencia F7 e F13, refletindo a estreita relação existente entre manutenção, inspeção e detecção de anomalias.

A degradação progressiva do cabo é representada pelos acoplamentos entre F8 e F9. A utilização continuada do sistema sob determinadas condições operacionais contribui para o agravamento da degradação estrutural do cabo, situação que influencia posteriormente a capacidade de resposta dos sistemas de segurança representados pelas funções F10 e F11.

Por fim, a interação entre F10, F11 e F12 representa a fase final do acidente. A insuficiente atuação dos mecanismos de travagem influencia a capacidade de imobilização das cabinas, contribuindo para o desenvolvimento das condições que culminaram na colisão observada durante o evento.

Os acoplamentos descritos nesta secção constituem a base para a construção do modelo FRAM do Ascensor da Glória, apresentado na secção seguinte, onde será possível visualizar de forma integrada as relações estabelecidas entre as diferentes funções identificadas.

4.1.3 Organização Funcional do Modelo Fram do Ascensor da Glória

Após a identificação das funções que compõem o modelo FRAM do Ascensor da Glória, procedeu-se à sua organização e análise com o objetivo de representar as principais interações identificadas na investigação realizada pelo GPIAAF (2025). As funções selecionadas procuram representar diferentes aspetos associados ao acidente, incluindo elementos técnicos relacionados com o cabo de tração/equilíbrio e os seus dispositivos de fixação, bem como atividades operacionais, práticas de gestão da segurança e mecanismos de acompanhamento técnico identificados ao longo da investigação.

A construção das funções foi realizada com base nas evidências apresentadas no Relatório Preliminar do GPIAAF, procurando assegurar que cada função estivesse associada a elementos efetivamente identificados durante a investigação. A descrição detalhada das funções, a respetiva fundamentação documental e as páginas do relatório utilizadas para sustentar a sua inclusão no modelo encontram-se apresentadas no Apêndice A na tabela 5.

Embora a análise individual das funções seja importante para compreender a construção do modelo, a sua observação isolada não permite visualizar facilmente a forma como os diferentes elementos se relacionam. Por esse motivo, as funções foram organizadas em grupos funcionais com características semelhantes, procurando apenas facilitar a apresentação e interpretação do modelo.

Importa salientar que estes agrupamentos não constituem categorias formais do método FRAM nem representam uma sequência linear de acontecimentos. As funções podem estabelecer relações e influências entre diferentes grupos funcionais, refletindo a natureza interligada do sistema analisado.

A Tabela 2 apresenta os grupos funcionais definidos para apoiar a descrição das funções e dos principais acoplamentos identificados no modelo FRAM do Ascensor da Glória.

Tabela 2 - Agrupamento Funcional das Funções Consideradas no Modelo FRAM do Ascensor da Glória

Grupo funcional	Funções associadas
Condições organizacionais e regulatórias	F14 – Aplicar enquadramento legal e supervisão técnica insuficientes
Seleção, aceitação e utilização do cabo	F1 – Adquirir cabo inadequado; F2 – Aceitar inadequadamente cabo não conforme; F3 – Ignorar restrição técnica de utilização do cabo; F4 – Utilizar cabo incompatível com especificação; F5 – Executar inadequadamente a fixação da pinha
Manutenção, inspeção e deteção das condições degradadas	F6 – Executar manutenção insuficiente do sistema; F7 – Inspeccionar inadequadamente a zona crítica; F13 – Falhar na deteção de condições degradadas
Degradação progressiva do cabo durante a operação	F8 – Submeter o cabo a esforços contínuos; F9 – Agravar degradação estrutural do cabo
Sistemas de segurança e ocorrência do acidente	F10 – Ativar insuficientemente o sistema de freio; F11 – Executar imobilização insuficiente das cabinas; F12 – Produzir colisão das cabinas

Fonte: Elaboração própria com base no GPIAAF, 2025.

A organização apresentada na Tabela 3 foi utilizada apenas como recurso de apoio à análise. Nas secções seguintes, cada grupo funcional é apresentado individualmente com o objetivo de facilitar a descrição das funções consideradas no modelo e dos principais acoplamentos estabelecidos entre elas.

4.1.3.1 Condições Organizacionais e Regulatórias

O modelo inicia-se com a função F14 – Aplicar enquadramento legal e supervisão técnica insuficientes. Esta função representa o contexto organizacional e regulatório identificado pelo GPIAAF como relevante para compreender as condições que antecederam o acidente.

Segundo o Relatório Preliminar do GPIAAF (2025), os Ascensores da Glória e da Lavra encontravam-se numa situação particular do ponto de vista regulatório, permanecendo fora de determinados regimes de supervisão técnica aplicáveis a outros sistemas de transporte por cabo. O relatório refere igualmente a inexistência de uma entidade supervisora independente responsável pela verificação sistemática das condições de segurança do sistema, concentrando essa responsabilidade essencialmente na própria entidade operadora.

No modelo FRAM, esta função influencia diversas atividades relacionadas com aquisição de componentes, manutenção, inspeção e controlo das condições operacionais. Assim, F14 foi posicionada como uma função com influência transversal sobre o sistema, representando um contexto organizacional que contribuiu para a permanência de condições degradadas ao longo do tempo.

4.1.3.2 Seleção, Aceitação e Utilização do Cabo

O segundo grupo funcional é constituído pelas funções F1, F2, F3, F4 e F5. Estas funções representam o conjunto de decisões e atividades que permitiram a introdução e utilização do cabo no sistema.

Segundo o GPIAAF (2025), o cabo adquirido para o Ascensor da Glória apresentava características distintas das especificações previstas pela CCFL. Apesar dessas diferenças, o processo de receção e aceitação não identificou as desconformidades existentes. A investigação refere que os mecanismos de controlo da qualidade não detetaram incompatibilidades relacionadas com a construção do cabo, a graduação do aço e as condições previstas para a sua utilização.

Neste contexto, as funções F1 e F2 representam, respetivamente, a aquisição do cabo e a sua posterior aceitação sem deteção das divergências existentes. A função F3 traduz a não consideração das restrições técnicas indicadas pelo fabricante, nomeadamente a incompatibilidade da utilização do cabo com destorcedores. O certificado do fabricante indicava explicitamente que o cabo não deveria ser utilizado com este tipo de dispositivo (GPIAAF, 2025). Como consequência, o cabo foi integrado em serviço, situação representada pela função F4.

A sequência culmina na função F5 – Executar inadequadamente a fixação da pinha. A investigação identificou fragilidades relacionadas com os procedimentos adotados na execução e controlo deste componente, incluindo ausência de critérios formais de aceitação e limitações nos mecanismos de verificação da qualidade da fundição (GPIAAF, 2025).

Estas funções surgem na fase inicial do modelo porque representam as condições que introduziram vulnerabilidades técnicas relevantes no sistema antes da degradação observada durante a operação.

4.1.3.3 Manutenção, Inspeção e Deteção de Condições Degradadas

O terceiro grupo funcional integra as funções F6, F7 e F13, associadas às atividades de manutenção, inspeção e deteção das condições degradadas.

O Relatório Preliminar do GPIAAF refere a existência de procedimentos de manutenção e de registos associados às atividades realizadas. Contudo, foram igualmente identificadas limitações relacionadas com a atualização de procedimentos, execução de determinadas tarefas críticas e mecanismos de controlo da qualidade (GPIAAF, 2025). Estas condições são representadas pela função F6 – Executar manutenção insuficiente do sistema.

A função F7 – Inspeccionar inadequadamente a zona crítica representa as limitações identificadas na capacidade de observação da região onde ocorreu a rotura. Segundo a investigação, a zona localizada no interior do destorcedor não era passível de observação visual direta sem desmontagem do componente, situação que dificultava a identificação de sinais de degradação (GPIAAF, 2025).

A interação entre manutenção e inspeção influencia diretamente a função F13 – Falhar na deteção de condições degradadas. Esta função representa a incapacidade do sistema para reconhecer atempadamente sinais de deterioração que se desenvolviam progressivamente no cabo e nos seus componentes associados. Como resultado, a operação continuou sem que fossem implementadas medidas corretivas capazes de interromper a evolução das condições degradadas.

4.1.3.4 Degradação Progresssiva do Cabo durante a Operação

As funções F8 e F9 representam a evolução física da degradação do cabo ao longo do tempo.

A função F8 – Submeter o cabo a esforços contínuos traduz as solicitações mecânicas decorrentes da operação normal do Ascensor da Glória. Após a sua entrada em serviço, o cabo permaneceu sujeito a ciclos repetidos de carregamento, movimento e interação com os componentes do sistema durante aproximadamente 337 dias de operação (GPIAAF, 2025).

Por sua vez, a função F9 – Agravar degradação estrutural do cabo representa a acumulação gradual dos mecanismos de deterioração identificados pela investigação. O GPIAAF observou evidências de roturas progressivas nos cordões do cabo, indicando que a degradação se desenvolveu ao longo do tempo e não de forma instantânea (GPIAAF, 2025).

O posicionamento destas funções procura representar a natureza gradual do fenómeno. A degradação observada resulta da interação entre características do cabo, condições de utilização, limitações de inspeção e incapacidade de deteção das anomalias existentes.

4.1.3.5 Sistemas de Segurança e Ocorrência do Acidente

O último grupo funcional é constituído pelas funções F10, F11 e F12, que representam a fase final do acidente.

De acordo com o GPIAAF (2025), após a rotura do cabo, os sistemas previstos para situações de emergência foram efetivamente acionados. O sistema de deteção da rotura atuou e desencadeou os mecanismos de segurança previstos para a situação.

Contudo, apesar da atuação dos sistemas de travagem, a sua eficácia revelou-se insuficiente para garantir a imobilização das cabinas. O relatório refere que os mecanismos de frenagem reduziram a aceleração do veículo, mas não conseguiram impedir a continuação do movimento.

A função F10 representa esta atuação insuficiente dos sistemas de freio. Em seguida, a função F11 traduz a incapacidade dos mecanismos de segurança para assegurar a imobilização efetiva das cabinas. A interação entre estas funções conduz à função F12 – Produzir colisão das cabinas, que representa a materialização do acidente.

Importa salientar que a descrição apresentada nesta secção tem como objetivo explicar a estrutura funcional do modelo e os principais acoplamentos estabelecidos entre as funções. A análise das interações dinâmicas e da propagação dos efeitos entre as diferentes funções será desenvolvida posteriormente.

A organização das funções e dos respetivos acoplamentos permitiu construir uma representação coerente com as evidências identificadas pelo GPIAAF. Na secção seguinte apresenta-se o modelo FRAM do Ascensor da Glória, permitindo visualizar graficamente as interações estabelecidas entre as funções consideradas na presente investigação.

4.1.4 Representação Gráfica do Modelo Fram do Ascensor da Glória

Após a identificação das funções relevantes para o acidente e da definição dos respetivos acoplamentos, procedeu-se à construção do modelo FRAM do Ascensor da Glória. O modelo foi desenvolvido utilizando o software FRAM Model Visualiser (FMV), permitindo representar graficamente as interações desde a aceitação do cabo até o acidente identificados no Relatório Preliminar do GPIAAF (2025).

A Figura 7 apresenta a estrutura funcional do modelo FRAM desenvolvido para o Ascensor da Glória.

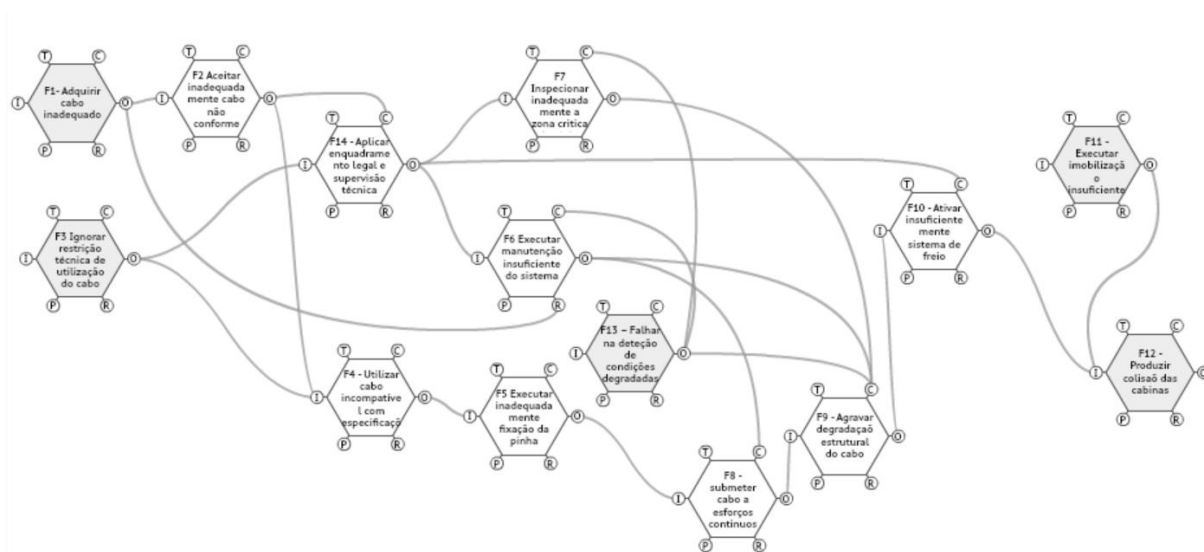


Figura 7 – Modelo FRAM do Ascensor da Glória. Fonte: Elaboração própria com base no Relatório Preliminar do GPIAAF (2025), utilizando o software FRAM Model Visualiser (FMV).

A representação gráfica permite visualizar de forma integrada as interações estabelecidas entre as funções consideradas relevantes para a compreensão do acidente. Em conformidade com os princípios do método, o modelo não procura representar uma sequência linear de eventos, mas sim um conjunto de funções interdependentes cuja variabilidade pode propagar-se através do sistema e contribuir para a emergência de resultados inesperados.

A representação gráfica evidencia a existência de múltiplas interações entre funções distribuídas por diferentes níveis do sistema. Observa-se a presença simultânea de fatores relacionados com decisões organizacionais e regulatórias, processos de aquisição e utilização de componentes, atividades de manutenção e inspeção, mecanismos de detecção de anomalias, processos de degradação física e sistemas de segurança. Esta configuração reforça a perspectiva sistêmica adotada pelo FRAM, segundo a qual os acidentes emergem da interação entre diversas funções ao longo do tempo e não da ocorrência de uma única falha isolada.

Adicionalmente, o modelo evidencia que a evolução do acidente não pode ser compreendida através de uma relação simples de causa e efeito. Pelo contrário, a configuração observada demonstra a existência de múltiplas dependências entre funções pertencentes a diferentes níveis do sistema sociotécnico, permitindo visualizar como condições organizacionais, decisões técnicas e processos operacionais contribuíram conjuntamente para a construção do cenário accidental.

Deste modo, a representação gráfica apresentada constitui a base para a análise das interações existentes entre as funções do sistema. Na secção seguinte procede-se à análise da variabilidade funcional, procurando compreender de que forma as variações observadas nas diferentes funções se propagaram através dos acoplamentos identificados e contribuíram para a ocorrência do acidente.

4.1.5 Análise da Variabilidade Funcional

A análise da variabilidade funcional constitui uma das etapas centrais da aplicação do Functional Resonance Analysis Method (FRAM), uma vez que permite compreender de que forma diferenças no desempenho das funções podem influenciar o comportamento global de sistemas sociotécnicos complexos.

Segundo Hollnagel (2012), a variabilidade funcional é uma característica inerente ao funcionamento dos sistemas, uma vez que as funções raramente são executadas exatamente da mesma forma em todas as circunstâncias. As organizações, os equipamentos e os operadores adaptam continuamente o seu desempenho para responder a restrições, exigências operacionais e condições específicas de cada contexto. Assim, a variabilidade não deve ser entendida exclusivamente como erro, falha ou incumprimento, mas como uma propriedade normal dos sistemas, capaz de produzir tanto resultados desejados como consequências indesejadas.

No modelo FRAM desenvolvido para o acidente do Ascensor da Glória, a variabilidade funcional encontra-se distribuída por diferentes níveis do sistema, envolvendo funções relacionadas com aspetos organizacionais, regulatórios, técnicos, operacionais e de supervisão. Esta distribuição evidencia que as condições que contribuíram para o acidente não se encontravam concentradas numa única atividade ou componente, mas resultavam da interação entre diferentes funções que influenciavam o desempenho global do sistema.

Uma primeira fonte de variabilidade pode ser observada nas funções associadas ao enquadramento legal e à supervisão técnica. O relatório do GPIAAF (2025) identifica limitações relacionadas com o contexto regulatório aplicável ao sistema e com a ausência de mecanismos independentes de supervisão técnica capazes de acompanhar de forma sistemática determinadas condições de segurança.

Estas circunstâncias introduzem variabilidade na forma como os riscos são identificados, avaliados e acompanhados ao longo do tempo. Embora esta variabilidade não produza efeitos imediatos sobre a operação do ascensor, influencia as condições em que outras funções são executadas, afetando processos relacionados com aquisição de componentes, manutenção, inspeção e deteção de anomalias.

A variabilidade funcional manifesta-se igualmente nas atividades associadas à seleção, aceitação e utilização do cabo de tração. As evidências apresentadas pelo GPIAAF (2025) demonstram que o cabo adquirido possuía características incompatíveis com determinadas condições de utilização existentes no sistema.

A aceitação do cabo, a não consideração das restrições técnicas identificadas pelo fabricante e a sua posterior entrada em serviço evidenciam diferenças entre as condições previstas para o funcionamento do sistema e aquelas que efetivamente se verificaram na prática. Estas diferenças introduziram uma importante fonte de variabilidade técnica, que passou a influenciar o comportamento das funções subsequentes e as condições de operação do ascensor.

Outra dimensão relevante da variabilidade funcional encontra-se associada às atividades de manutenção, inspeção e deteção de condições degradadas. O relatório do GPIAAF (2025) identifica limitações relacionadas com procedimentos de manutenção, registos técnicos e métodos de inspeção utilizados no sistema. Em particular, a impossibilidade de observação direta de determinadas zonas críticas do cabo reduzia a capacidade de identificação atempada de processos de degradação em desenvolvimento. Nesta perspetiva, a variabilidade não decorre apenas da existência de danos ou desconformidades, mas também das limitações existentes nos mecanismos destinados a detetar essas condições. Como resultado, determinadas alterações no estado do sistema puderam evoluir sem serem identificadas ou avaliadas de forma eficaz.

A utilização continuada do cabo ao longo do tempo constitui igualmente uma importante fonte de variabilidade funcional. O cabo permaneceu em operação durante um período prolongado, sendo submetido a sucessivos ciclos de carregamento e esforço mecânico. De acordo com o GPIAAF (2025), estas condições contribuíram para a acumulação progressiva de degradação estrutural, evidenciada por sinais de desgaste e roturas observadas durante a investigação. Neste contexto, a variabilidade funcional manifesta-se através da evolução gradual das condições físicas do componente, produzindo alterações que se acumulam ao longo do tempo e influenciam progressivamente o desempenho do sistema.

Importa salientar que estas diferentes formas de variabilidade não devem ser interpretadas como fenómenos independentes. Conforme referido por Hollnagel (2012), pequenas diferenças de desempenho podem propagar-se através dos acoplamentos existentes entre funções, influenciando atividades localizadas noutras partes do sistema. Aplicações do FRAM apresentadas por França et al. (2019) e França et al. (2020) demonstram igualmente que a compreensão dos acidentes exige a análise das interações estabelecidas entre múltiplas funções e não apenas a observação isolada de eventos específicos.

No caso do Ascensor da Glória, as variabilidades identificadas ao nível da supervisão técnica, da utilização do cabo, da manutenção, da inspeção e da degradação estrutural coexistiam no sistema antes da ocorrência do acidente, contribuindo para modificar progressivamente as condições em que as restantes funções eram executadas.

A análise realizada evidencia, assim, que a variabilidade funcional estava distribuída por diferentes componentes do sistema e não associada a uma única atividade ou decisão específica.

Esta constatação reforça a perspetiva sistémica proposta pelo FRAM, segundo a qual o comportamento global dos sistemas emerge da interação entre múltiplas funções que operam simultaneamente em diferentes níveis organizacionais e operacionais. As diferentes variabilidades identificadas no modelo não atuaram de forma isolada, influenciando-se mutuamente através dos respetivos acoplamentos. A compreensão destas interações torna-se fundamental para explicar a evolução do acidente, sendo analisada na secção seguinte através do conceito de ressonância funcional.

4.1.6 Análise da Ressonância Funcional

Após a construção do modelo FRAM do Ascensor da Glória, tornou-se possível analisar a forma como a variabilidade do desempenho das diferentes funções se propagou através do sistema e contribuiu para a ocorrência do acidente. Com o apoio do FRAM Model Visualiser (FMV), foi realizada uma simulação dessa dinâmica entre as funções consideradas no modelo, permitindo identificar os principais percursos de interação e amplificação da variabilidade ao longo do sistema.

A análise do modelo demonstra que a propagação da variabilidade não deve ser interpretada apenas como uma sequência de eventos técnicos. Antes mesmo dos percursos de propagação

evidenciados pela simulação, o sistema já apresentava condições organizacionais e operacionais degradadas que influenciavam o desempenho das restantes funções.

Neste contexto, F14 (Aplicar enquadramento legal e supervisão técnica insuficientes), F6 (Executar manutenção insuficiente do sistema), F7 (Inspeccionar inadequadamente a zona crítica) e F13 (Falhar na deteção de condições degradadas) comprometeram a capacidade do sistema para reconhecer, controlar ou interromper a evolução da degradação, permitindo que essas condições permanecessem ativas ao longo do tempo.

Entre os diferentes percursos identificados, destacou-se um dos percursos predominantes de propagação da variabilidade, iniciando-se em F3 (Ignorar restrição técnica de utilização do cabo) e estendendo-se até F12 (Produzir colisão das cabinas). A Figura 8 apresenta esse percurso funcional, o qual evidenciou maior continuidade na propagação da variabilidade até à ocorrência do acidente, sem excluir a influência das restantes funções organizacionais e de supervisão que sustentaram o comportamento global do sistema.

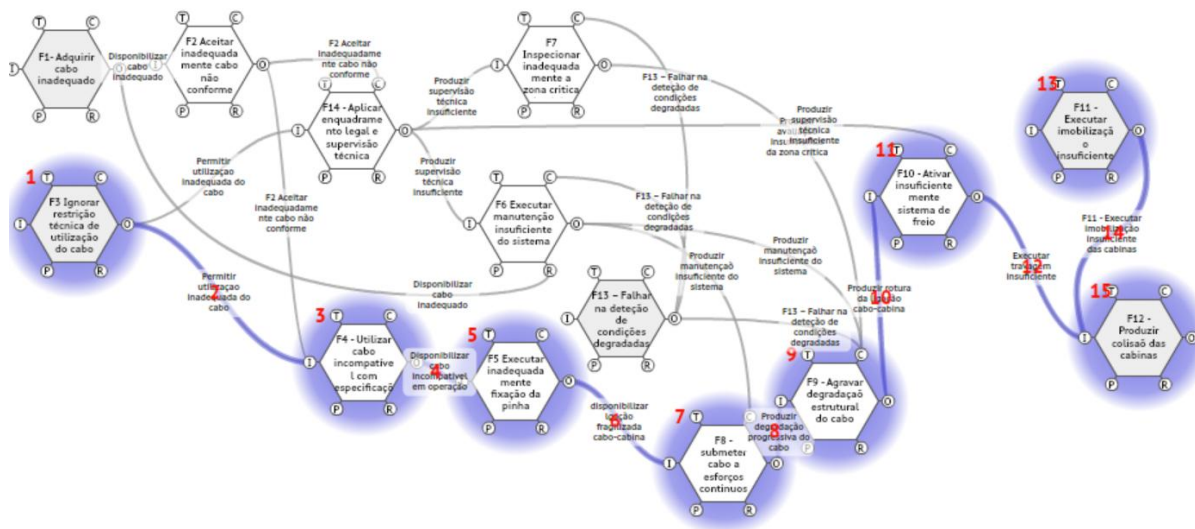


Figura 8– Principal trajetória de propagação da variabilidade identificada no modelo FRAM do Ascensor da Glória. Fonte: Elaboração própria com recurso ao FRAM Model Visualiser (FMV).

A análise da Figura 8 evidencia que a variabilidade inicialmente presente em F3 (Ignorar restrição técnica de utilização do cabo) propagou-se para F4 (Utilizar cabo incompatível com as especificações do sistema), permitindo que condições incompatíveis com as recomendações técnicas fossem incorporadas na operação do ascensor. Embora os efeitos dessa variabilidade não se tenham manifestado de forma imediata, a sua presença criou condições favoráveis ao

desenvolvimento de vulnerabilidades que permaneceram ativas durante a exploração do sistema.

À medida que a variabilidade se propagou para F5 (Executar inadequadamente a fixação da pinha), os seus efeitos passaram a influenciar a ligação entre o cabo e a cabina, aumentando a vulnerabilidade desse componente.

A continuidade da operação, representada por F8 (Submeter o cabo a esforços contínuos), contribuiu para a amplificação progressiva desses efeitos, uma vez que o funcionamento repetido do ascensor manteve o cabo sujeito às condições de utilização existentes, favorecendo a acumulação gradual da degradação.

Essa acumulação torna-se particularmente evidente em F9 (Agravar degradação estrutural do cabo). A análise da simulação permite interpretar esta função como um ponto de convergência da variabilidade propagada ao longo do percurso predominante. Embora a Figura 8 represente apenas um dos percursos identificados no modelo, a evolução da variabilidade observada nesse percurso foi favorecida pelas condições organizacionais e de supervisão anteriormente descritas, que permitiram a permanência dessas vulnerabilidades e reduziram a capacidade do sistema para interromper a sua propagação.

Em F9, a acumulação da variabilidade torna-se mais evidente, revelando um processo de amplificação resultante das interações estabelecidas entre as diferentes funções do sistema. Por esta razão, esta função constitui o principal ponto de acumulação da variabilidade observado na trajetória de ressonância funcional identificada.

A partir de F9, a variabilidade acumulada propagou-se para as funções associadas à resposta do sistema perante a situação de emergência. A influência exercida sobre F10 (Ativar insuficientemente o sistema de freio) demonstra que os mecanismos de segurança passaram a atuar sob condições já condicionadas pela degradação anteriormente acumulada. Essa variabilidade continuou a propagar-se para F11 (Executar imobilização insuficiente das cabinas), refletindo limitações na capacidade do sistema para controlar eficazmente a situação. Como consequência, os efeitos acumulados ao longo desse percurso culminaram em F12 (Produzir colisão das cabinas), função que representa a materialização do acidente.

A análise realizada evidencia que a colisão das cabinas não resultou de uma única interação isolada, mas da propagação progressiva da variabilidade entre funções interdependentes

distribuídas por diferentes níveis do sistema. Embora a Figura 8 destaque um dos percursos predominantes identificados na simulação, este deve ser interpretado em conjunto com as funções organizacionais e de supervisão que criaram e mantiveram as condições necessárias para que essa propagação ocorresse. Assim, o acidente é compreendido como uma propriedade emergente do comportamento global do sistema, resultante da interação entre múltiplas funções, e não como consequência de uma única falha técnica ou de uma única função isolada.

Embora o modelo apresente outros percursos possíveis de propagação da variabilidade, a presente análise concentrou-se naquele que evidenciou maior continuidade funcional até à ocorrência do acidente, por representar, de forma mais clara, a dinâmica de propagação e amplificação da variabilidade observada no modelo.

4.2 MODELO FRAM DO ELÉTRICO DE SANTA TERESA

A análise desenvolvida no Capítulo 3 permitiu identificar um conjunto de fatores técnicos, operacionais, organizacionais e de gestão da segurança associados ao acidente ocorrido com o Elétrico de Santa Teresa em agosto de 2011. Os elementos identificados evidenciam que o evento se desenvolveu num contexto caracterizado pela interação entre condições relacionadas com a operação do sistema, a manutenção dos veículos, a supervisão das condições de segurança e a gestão dos riscos existentes (Silva, 2020).

Neste contexto, foi desenvolvido um modelo recorrendo ao método Functional Resonance Analysis Method (FRAM), com o objetivo de representar as principais funções envolvidas na dinâmica do sistema e as respetivas interações. A construção do modelo teve por base as evidências identificadas na análise documental realizada, particularmente os elementos discutidos por Silva (2020), procurando representar não apenas aspetos diretamente relacionados com o veículo acidentado, mas também condições associadas à operação, manutenção, supervisão e gestão da segurança.

Deste modo, a modelação permitiu estruturar uma representação do sistema que antecedeu o acidente e compreender de que forma diferentes funções contribuíram para a evolução das condições observadas.

Tal como realizado no caso do Ascensor da Glória, o modelo foi desenvolvido com o propósito de compreender as interações existentes entre múltiplas funções distribuídas por diferentes níveis do sistema, permitindo analisar a forma como determinadas condições se desenvolveram e influenciaram o comportamento global do sistema ao longo do tempo. Nas secções seguintes são apresentadas as funções consideradas no modelo FRAM do Elétrico de Santa Teresa, a fundamentação da sua seleção, os principais acoplamentos identificados, a representação gráfica do modelo e a respetiva análise da ressonância funcional.

4.2.1 Identificação das Funções

A construção do modelo FRAM do Elétrico de Santa Teresa teve início com a identificação das funções consideradas relevantes para representar a dinâmica do sistema associada ao acidente ocorrido em agosto de 2011. Este processo foi desenvolvido a partir da análise das evidências apresentadas por Silva (2020), utilizada como principal fonte de informação para a compreensão das condições que antecederam o evento e para a identificação das funções consideradas na modelação do sistema.

A identificação das funções procurou refletir os elementos que, de acordo com as fontes analisadas, exerceram influência significativa na evolução do acidente. Em vez de se concentrar exclusivamente nos aspetos técnicos do veículo, a análise considerou também fatores relacionados com a operação, a manutenção, a supervisão das condições de segurança e a gestão do sistema. Esta opção decorre da própria natureza das evidências identificadas por Silva (2020), que descrevem um contexto marcado pela interação entre diferentes fatores e não pela existência de uma única falha isolada.

Importa salientar que o objetivo da modelação não consistiu em reproduzir todas as atividades desenvolvidas pelo sistema de bondes de Santa Teresa. Procurou-se, antes, selecionar as funções que apresentavam maior relevância para a compreensão da dinâmica do acidente e da forma como determinadas condições se desenvolveram ao longo do tempo.

Esta opção é consistente com a abordagem proposta por Hollnagel (2012), segundo a qual a construção de um modelo FRAM deve privilegiar as funções consideradas relevantes para compreender o fenómeno em análise, não sendo necessário representar exaustivamente todas as atividades existentes no sistema.

Assim, a seleção das funções foi orientada pela sua capacidade de representar aspetos que influenciaram o comportamento do sistema e contribuíram para a evolução das condições observadas, permitindo construir um modelo coerente com as evidências documentais analisadas. O processo de identificação das funções foi desenvolvido de forma progressiva. Durante a construção do modelo, algumas funções foram ajustadas e reformuladas com o objetivo de melhorar a correspondência entre a representação funcional e os elementos descritos nas fontes consultadas. Este procedimento permitiu aperfeiçoar a estrutura do modelo e assegurar que as funções selecionadas refletiam adequadamente os aspetos considerados mais relevantes para a compreensão do acidente.

Deste modo, o conjunto de funções definido para o modelo FRAM procura representar tanto ações diretamente relacionadas com a operação do sistema como condições organizacionais e de gestão que influenciaram o seu funcionamento. A coerência entre as funções selecionadas e os fatores discutidos no Capítulo 3 constitui um elemento fundamental para a construção do modelo. Na secção seguinte são apresentadas as funções consideradas e os principais acoplamentos estabelecidos entre elas, permitindo compreender a lógica de funcionamento adotada na modelação do acidente do Elétrico de Santa Teresa.

4.2.2 Descrição das Funções e dos Acoplamentos

Após a identificação das funções consideradas relevantes para a modelação do acidente do Elétrico de Santa Teresa, procedeu-se à sua organização no modelo FRAM e à definição dos principais acoplamentos estabelecidos entre elas. A construção do modelo teve por base as evidências identificadas nas fontes analisadas, procurando representar de forma integrada as condições técnicas, operacionais, organizacionais e de gestão da segurança que contribuíram para a evolução do sistema até à ocorrência do acidente.

As funções selecionadas representam diferentes dimensões do sistema, incluindo atividades diretamente relacionadas com a operação do bonde, bem como aspetos associados à supervisão da segurança, à adaptação das operações, à degradação progressiva do sistema e à gestão das condições de risco. A seleção das funções foi realizada com base na análise das evidências apresentadas por Silva (2020), principal fonte documental utilizada na construção do modelo FRAM do acidente do Elétrico de Santa Teresa. A fundamentação documental detalhada das funções consideradas no modelo encontra-se apresentada no Apêndice B na tabela 6.

A Tabela 3 apresenta as funções consideradas na construção do modelo FRAM do Elétrico de Santa Teresa e que servem de base para a análise desenvolvida neste capítulo.

Tabela 3 - Funções Consideradas no Modelo FRAM do Elétrico de Santa Teresa

Função	Descrição
F1	Permitir superlotação do bonde
F2	Prosseguir operação do bonde em condições inseguras
F3	Operar freios em condição degradada
F4	Perder controle da velocidade do bonde
F5	Colidir o bonde com infraestrutura urbana
F6	Falhar na supervisão da segurança
F7	Ignorar sinais de degradação do sistema
F8	Funcionar o bonde em condições degradadas
F9	Adaptar a operação para continuar o serviço
F10	Manter circulação do bonde apesar das vulnerabilidades
F11	Aumentar procura pelo serviço do bonde
F12	Acumular degradação histórica do sistema
F13	Aceitar continuidade de condições de risco
F14	Permitir continuidade de condições inseguras

Fonte: Elaboração própria com base em Silva (2020).

Os acoplamentos estabelecidos entre as funções foram definidos com base nas evidências apresentadas por Silva (2020) e procuram representar as principais interações identificadas no sistema. Estas ligações permitem compreender de que forma diferentes condições presentes no contexto organizacional, operacional e técnico se relacionavam e influenciavam o funcionamento do bonde.

Um dos conjuntos de acoplamentos mais relevantes envolve as funções F11 – Aumentar procura pelo serviço do bonde e F1 – Permitir superlotação do bonde. Neste caso, o modelo procura representar a influência da elevada procura pelo serviço sobre os níveis de ocupação observados nos veículos. A ligação entre estas funções permite evidenciar que as exigências impostas ao sistema não resultavam apenas das suas condições internas, mas também da intensidade da sua utilização.

A função F1 encontra-se igualmente ligada à função F3 – Operar freios em condição degradada. Este acoplamento procura representar a forma como as condições de ocupação do veículo podiam influenciar o contexto em que os sistemas de travagem eram utilizados durante a operação. A função F11 estabelece ainda uma ligação direta com F3, reforçando a relação entre a procura pelo serviço e as condições operacionais observadas no sistema.

Outro conjunto importante de acoplamentos envolve as funções F8 – Funcionar o bonde em condições degradadas, F9 – Adaptar a operação para continuar o serviço e F10 – Manter circulação do bonde apesar das vulnerabilidades. Estas ligações representam a continuidade da exploração do sistema num contexto caracterizado por limitações técnicas, degradação acumulada e necessidade de adaptação das atividades operacionais para assegurar a prestação do serviço.

As funções F13 – Aceitar continuidade de condições de risco e F14 – Permitir continuidade de condições inseguras apresentam igualmente ligações com várias funções operacionais do modelo. Estes acoplamentos procuram representar a influência de condições existentes ao nível da gestão da segurança e da aceitação de vulnerabilidades sobre o funcionamento quotidiano do sistema. A sua presença evidencia que fatores organizacionais e operacionais se encontravam fortemente interligados.

Observam-se também acoplamentos entre as funções F7 – Ignorar sinais de degradação do sistema, F6 – Falhar na supervisão da segurança e F2 – Prosseguir operação do bonde em

condições inseguras. Estas ligações permitem representar a relação entre a identificação de problemas, a capacidade de supervisão das condições existentes e a continuidade da operação do sistema.

Por fim, os acoplamentos entre F2 – Prosseguir operação do bonde em condições inseguras, F3 – Operar freios em condição degradada, F4 – Perder controlo da velocidade do bonde e F5 – Colidir o bonde com infraestrutura urbana representam a fase mais próxima da ocorrência do acidente. Estas ligações permitem representar a interação entre as condições operacionais existentes, o desempenho dos sistemas de travagem, a perda de controlo do veículo e a materialização do evento accidental.

Convém referir que estes acoplamentos não representam uma sequência linear de acontecimentos nem uma cadeia simples de causa e efeito. Em conformidade com os princípios do FRAM, as ligações identificadas representam um conjunto de interações entre funções interdependentes, permitindo compreender como diferentes condições presentes no sistema se influenciavam mutuamente.

4.2.3 Organização Funcional do Modelo Fram do Elétrico de Santa Teresa

Para facilitar a interpretação do modelo, as funções foram agrupadas de acordo com características semelhantes. A Tabela 4 apresenta a organização funcional adotada para o modelo FRAM do Elétrico de Santa Teresa.

Tabela 4 - Agrupamento Funcional das Funções Consideradas no Modelo FRAM do Elétrico de Santa Teresa

Agrupamento funcional	Funções
Condições organizacionais e históricas	F12 – Acumular degradação histórica do sistema; F7 – Ignorar sinais de degradação do sistema; F6 – Falhar na supervisão da segurança; F13 – Aceitar continuidade de condições de risco; F14- Permitir continuidade de condições inseguras
Continuidade operacional do sistema	F8 – Funcionar o bonde em condições degradadas; F9 – Adaptar a operação para continuar o serviço; F10 – Manter circulação do bonde apesar das vulnerabilidades
Pressão operacional e utilização do sistema	F11 – Aumentar procura pelo serviço do bonde; F1 – Permitir superlotação do bonde
Dinâmica imediata do acidente	F2 – Prosseguir operação do bonde em condições inseguras; F3 – Operar freios em condição degradada; F4 – Perder controle da velocidade do bonde; F5 – Colidir o bonde com infraestrutura urbana

Estes agrupamentos foram definidos apenas como um recurso de apoio à análise. No contexto do FRAM, as funções não atuam de forma isolada nem se encontram limitadas ao grupo em que foram inseridas, podendo estabelecer relações e influências com funções pertencentes a diferentes agrupamentos funcionais.

Nos tópicos seguintes são apresentados os grupos funcionais considerados no modelo, bem como as principais interações e acoplamentos identificados entre as funções, procurando evidenciar de que forma diferentes condições presentes no sistema contribuíram para a dinâmica do acidente.

4.2.3.1 Condições Organizacionais e Históricas

O primeiro agrupamento funcional do modelo é constituído pelas funções F12 – Acumular degradação histórica do sistema, F7 – Ignorar sinais de degradação do sistema, F6 – Falhar na supervisão da segurança e F13 – Aceitar continuidade de condições de risco. Estas funções foram agrupadas por representarem condições que se desenvolveram ao longo do tempo e que influenciaram o contexto em que o acidente ocorreu.

A sua inclusão no modelo é consistente com a abordagem proposta por Hollnagel (2012), segundo a qual a compreensão de eventos complexos exige a análise de fatores técnicos, organizacionais e de gestão que interagem continuamente no funcionamento dos sistemas sociotécnicos. De igual modo, aplicações do FRAM em diferentes contextos demonstram que a modelação de condições históricas e organizacionais é fundamental para compreender a emergência de acidentes e a forma como determinadas vulnerabilidades permanecem ativas no sistema (França et al., 2019; França et al., 2020).

Neste contexto, a função F12 – Acumular degradação histórica do sistema foi posicionada como um dos elementos estruturantes do modelo por representar o conjunto de fragilidades que se desenvolveram progressivamente no sistema de bondes de Santa Teresa. As evidências analisadas por Silva (2020) descrevem um cenário marcado pelo sucateamento dos veículos, pela deterioração das condições de manutenção, pela redução da disponibilidade operacional da frota e por problemas recorrentes nos sistemas de travagem.

A autora refere a existência de um “vasto e deplorável histórico de problemas nos freios” (Silva, 2020), bem como um processo generalizado de precarização do sistema (Silva, 2020). Adicionalmente, as referências ao estado de abandono das oficinas e às limitações estruturais identificadas após o acidente reforçam a interpretação de que as vulnerabilidades observadas em 2011 resultaram de um processo acumulativo e não de uma falha isolada ou inesperada (Silva, 2020).

A degradação progressiva representada por F12 contribui diretamente para a compreensão da função F7 – Ignorar sinais de degradação do sistema. As fontes analisadas indicam que diversos indícios das fragilidades existentes já eram conhecidos antes do acidente. Silva (2020) documenta a existência de reclamações de moradores, denúncias relacionadas com as condições dos bondes, acidentes anteriores e sucessivos problemas técnicos identificados pelos trabalhadores responsáveis pela manutenção.

Em particular, a autora refere que falhas foram reportadas e que existiam preocupações relativamente ao estado dos veículos e dos seus componentes críticos (Silva, 2020). Assim, a função F7 não representa a inexistência de sinais de alerta, mas a incapacidade do sistema para transformar esses sinais em ações preventivas capazes de interromper ou reduzir a degradação existente.

A persistência destas condições encontra correspondência na função F6 – Falhar na supervisão da segurança. As evidências reunidas sugerem que as fragilidades identificadas não estavam limitadas ao domínio técnico, envolvendo igualmente aspetos relacionados com a gestão dos recursos, o acompanhamento das condições operacionais e a implementação de medidas corretivas. Silva (2020) refere situações em que necessidades de manutenção e substituição de componentes eram identificadas pelos trabalhadores, mas nem sempre recebiam resposta adequada ao nível da gestão (Silva, 2020).

A autora menciona ainda problemas associados à disponibilidade de materiais, à qualidade de algumas peças utilizadas e à insuficiência de investimentos necessários para a recuperação do sistema. Neste sentido, F6 representa limitações nos mecanismos de supervisão e controlo que deveriam assegurar a manutenção de condições compatíveis com uma operação segura.

A interação entre estas funções contribui para justificar a inclusão de F13 – Aceitar continuidade de condições de risco. Esta função procura representar a permanência de condições problemáticas já conhecidas no sistema sem que fossem implementadas medidas eficazes capazes de eliminar ou reduzir significativamente os riscos existentes. As evidências documentais mostram que os problemas associados à manutenção, ao estado de conservação dos veículos e às limitações estruturais do sistema eram amplamente reconhecidos por diferentes intervenientes antes do acidente (Silva, 2020).

Apesar disso, a operação foi mantida e as vulnerabilidades permaneceram presentes. Neste contexto, F13 não deve ser entendida como uma decisão individual ou um ato deliberado, mas como uma condição emergente resultante da interação entre degradação acumulada, reconhecimento insuficiente dos sinais de deterioração e limitações na supervisão da segurança. A análise deste agrupamento funcional evidencia que a dinâmica do acidente começou a desenvolver-se muito antes da perda de controlo do veículo. As evidências identificadas apontam para a existência de um conjunto de condições históricas e organizacionais que influenciaram progressivamente o funcionamento do sistema e favoreceram a persistência das suas vulnerabilidades.

Por essa razão, as funções F12, F7, F6 e F13 constituem a base do modelo FRAM desenvolvido para o acidente do Elétrico de Santa Teresa, representando o conjunto de condições que permitiu a continuidade da operação em circunstâncias cada vez mais desfavoráveis. A partir destas condições emergem os processos relacionados com a manutenção do serviço e a adaptação operacional do sistema, analisados no agrupamento funcional seguinte.

4.2.3.2 Continuidade Operacional do Sistema

As evidências identificadas por Silva (2020) sugerem que o sistema de bondes de Santa Teresa se encontrava sujeito a limitações que ultrapassavam problemas pontuais de manutenção. As referências ao sucateamento da frota, aos problemas recorrentes de desempenho, ao estado de conservação dos veículos e às dificuldades associadas à manutenção indicam que parte significativa da operação ocorria num contexto de degradação progressiva do sistema (Silva, 2020). Neste enquadramento, a continuidade do serviço não pode ser compreendida apenas pela existência de falhas técnicas isoladas, mas pela forma como o sistema procurava manter a sua atividade apesar das restrições acumuladas ao longo do tempo.

A função F8 – Funcionar o bonde em condições degradadas emerge precisamente desta realidade operacional. Diversos excertos apresentados por Silva (2020) referem a existência de veículos com problemas conhecidos, dificuldades de manutenção e condições consideradas precárias por diferentes intervenientes.

A autora reproduz relatos que mencionam problemas técnicos recorrentes, deficiências no estado de conservação dos bondes e limitações estruturais que afetavam a operação diária do sistema (Silva, 2020). Estas evidências sugerem que o funcionamento do serviço ocorria num contexto em que as vulnerabilidades já faziam parte da rotina operacional, deixando de constituir situações excecionais e passando a integrar o funcionamento habitual do sistema.

A permanência destas condições contribui para compreender a função F9 – Adaptar a operação para continuar o serviço. Embora as fontes não descrevam explicitamente todos os mecanismos de adaptação utilizados pelos operadores, a manutenção da atividade mesmo perante limitações técnicas, problemas de desempenho e reduzida disponibilidade operacional sugere a existência de ajustamentos destinados a assegurar a continuidade do serviço (Silva, 2020).

A autora refere situações em que o veículo permanecia em circulação apesar de problemas identificados, bem como contextos operacionais marcados pela escassez de recursos e pela necessidade de manter o funcionamento do sistema. Neste sentido, F9 não representa uma adaptação específica documentada nas fontes, mas uma interpretação sistêmica construída a partir das evidências disponíveis, procurando representar os ajustamentos que permitiram acomodar as restrições existentes e assegurar a continuidade da operação.

Esta interpretação é consistente com a abordagem proposta por Hollnagel (2012), segundo a qual os sistemas sociotécnicos desenvolvem adaptações para responder às exigências operacionais e manter o funcionamento perante limitações e constrangimentos. Aplicações do FRAM em diferentes contextos também demonstram que estas adaptações constituem um elemento essencial para compreender o desempenho real dos sistemas e a forma como a variabilidade operacional se desenvolve ao longo do tempo (França et al., 2019; França et al., 2020).

A interação entre o funcionamento em condições degradadas e os ajustamentos realizados para assegurar a continuidade do serviço contribui para explicar a função F10 – Manter circulação do bonde apesar das vulnerabilidades.

A fonte analisada mostram que o sistema continuou a desempenhar a sua função de transporte apesar da existência de problemas conhecidos, limitações estruturais e dificuldades associadas à manutenção (Silva, 2020). Assim, F10 representa o resultado operacional da combinação entre degradação acumulada, adaptação contínua e necessidade de manter o serviço ativo, mesmo quando as condições existentes se afastavam progressivamente das consideradas adequadas para uma operação segura.

4.2.3.3 Pressão Operacional e utilização

A continuidade da circulação do bonde, analisada no agrupamento funcional anterior, permitiu que o sistema continuasse a desempenhar um papel relevante na mobilidade do bairro de Santa Teresa, mesmo perante as limitações técnicas e organizacionais já identificadas. Neste contexto, torna-se importante analisar de que forma a procura pelo serviço e a utilização intensiva do sistema influenciaram as condições operacionais existentes. Para o FRAM, fatores associados à procura, utilização e ocupação dos sistemas constituem elementos relevantes para a compreensão do desempenho global, uma vez que podem influenciar diretamente a forma como outras funções são executadas e interagem entre si (Hollnagel, 2012; França et al., 2019; França et al., 2020).

As evidências apresentadas por Silva (2020) demonstram que o bonde desempenhava uma função importante no quotidiano da população local, sendo simultaneamente um meio de transporte e um elemento característico da identidade do bairro.

A relevância do serviço para a mobilidade dos utilizadores é evidenciada pelas discussões posteriores ao acidente relativas à redução da capacidade dos veículos e às preocupações manifestadas por diferentes intervenientes quanto à possibilidade de diminuição da oferta de transporte (Silva, 2020). Estes elementos sugerem que a procura pelo serviço permanecia elevada, mesmo perante as limitações operacionais identificadas ao longo da investigação.

A partir deste contexto emerge a interação entre as funções F11 – Aumentar procura pelo serviço do bonde e F1 – Permitir superlotação do bonde. A procura pelo transporte não deve ser entendida apenas como um aumento do número de passageiros, mas como uma condição que exerce pressão adicional sobre a capacidade operacional disponível. Silva (2020) refere que o veículo envolvido no acidente transportava aproximadamente 60 passageiros, valor superior à capacidade prevista para a composição, estimada em 44 passageiros (Silva, 2020). A autora reproduz igualmente testemunhos que descrevem o veículo “enchendo mais e mais” nos momentos que antecederam o acidente (Silva, 2020), reforçando a existência de níveis elevados de ocupação.

A interação entre a procura pelo serviço e os elevados níveis de ocupação observados nos veículos demonstra que as condições operacionais existentes não eram influenciadas apenas pelas limitações técnicas e organizacionais previamente identificadas, mas também pelas exigências colocadas pela própria utilização do sistema.

A presença de um número de passageiros superior à capacidade prevista aumentava as solicitações impostas ao veículo e aos seus sistemas de operação, contribuindo para um contexto operacional mais exigente. Neste sentido, as funções analisadas neste agrupamento constituem um elo entre as condições de funcionamento do sistema e os eventos que antecederam diretamente o acidente.

A partir destas condições, torna-se necessário analisar de que forma a continuidade da operação em condições inseguras, associada às limitações do sistema de travagem, contribuiu para a perda de controlo da velocidade do veículo e para a consequente colisão, aspetos abordados no agrupamento funcional seguinte.

4.2.3.4 Dinâmica Imediata do Acidente

Após a análise das condições organizacionais e históricas, da continuidade operacional do sistema e das pressões associadas à utilização do serviço, torna-se possível compreender a fase final da dinâmica que culminou no acidente. Este agrupamento funcional reúne as funções F2 – Prosseguir operação do bonde em condições inseguras, F3 – Operar freios em condição degradada, F4 – Perder controlo da velocidade do bonde e F5 – Colidir o bonde com infraestrutura urbana. Importa salientar que estas funções não representam a origem do acidente, mas sim a etapa final de um processo que vinha sendo construído progressivamente através das interações analisadas nos agrupamentos anteriores. Nesta perspetiva, a perda de controlo do veículo e a colisão constituem manifestações visíveis de vulnerabilidades acumuladas ao longo do tempo e não acontecimentos isolados ou independentes do contexto em que ocorreram.

A função F2 – Prosseguir operação do bonde em condições inseguras representa a continuidade da exploração do sistema apesar da existência de limitações já identificadas ao nível técnico, operacional e organizacional. As evidências apresentadas por Silva (2020) demonstram que o sistema operava num contexto marcado por problemas recorrentes de manutenção, degradação dos veículos e dificuldades estruturais conhecidas por diferentes intervenientes (Silva, 2020). Neste sentido, F2 estabelece a ligação entre as condições analisadas anteriormente e os eventos que antecederam diretamente o acidente.

A sua inclusão no modelo procura representar a permanência da operação mesmo quando já existiam fatores capazes de comprometer os níveis desejáveis de segurança, evidenciando que a continuidade do serviço ocorreu num contexto de vulnerabilidades previamente existentes.

A continuidade da operação nestas circunstâncias contribui para compreender a função F3 – Operar freios em condição degradada. Silva (2020) apresenta diversas referências ao histórico de problemas associados ao sistema de travagem, incluindo relatos de falhas recorrentes, dificuldades de manutenção e conclusões periciais que identificaram deficiências nos freios do veículo envolvido no acidente (Silva, 2020).

Estas evidências demonstram que as limitações observadas no sistema de travagem não constituíam uma condição inesperada ou desconhecida.

Pelo contrário, os problemas identificados ao longo do tempo sugerem que o desempenho dos freios já vinha sendo influenciado pelas condições de degradação acumuladas anteriormente discutidas no modelo. Assim, F3 não representa apenas uma falha técnica localizada, mas a manifestação operacional de vulnerabilidades desenvolvidas progressivamente no sistema e influenciadas pelas condições organizacionais e operacionais analisadas nos agrupamentos anteriores.

A interação entre F2 e F3 contribui para explicar a função F4 – Perder controlo da velocidade do bonde. As evidências reunidas por Silva (2020) indicam que, nos momentos que antecederam o acidente, o veículo perdeu progressivamente a capacidade de reduzir e controlar a velocidade durante o percurso, situação posteriormente associada às deficiências identificadas no sistema de travagem (Silva, 2020).

No contexto do modelo FRAM, esta função representa uma consequência operacional resultante da interação entre a continuidade da operação em condições inseguras e o desempenho degradado dos freios. Por esta razão, F4 não deve ser interpretada como o ponto de origem do acidente. A perda de controlo da velocidade constitui antes uma etapa intermédia da dinâmica do sistema, refletindo a materialização de condições que já vinham sendo construídas através das interações entre diferentes funções distribuídas pelos vários níveis do sistema. A função F5 – Colidir o bonde com infraestrutura urbana representa a materialização física do acidente.

Segundo Silva (2020), após a perda de controlo da velocidade, o veículo descarrilou e colidiu contra elementos da infraestrutura urbana, produzindo as consequências já descritas no Capítulo 3 (Silva, 2020).

No modelo desenvolvido, esta função não corresponde a uma causa isolada, mas ao resultado observável da interação entre múltiplas funções. A colisão representa o momento em que as vulnerabilidades previamente existentes se tornam evidentes, revelando os efeitos acumulados das limitações organizacionais, técnicas e operacionais que influenciaram o funcionamento do sistema ao longo do tempo.

A análise deste agrupamento evidencia que a dinâmica imediata do acidente não pode ser compreendida de forma independente das condições previamente discutidas.

As funções F2, F3, F4 e F5 representam apenas a fase final de um processo que teve origem em condições históricas de degradação, limitações na supervisão da segurança, continuidade da operação em condições desfavoráveis e pressões associadas à utilização do sistema. Esta interpretação é consistente com a abordagem proposta por Hollnagel (2012), segundo a qual os acidentes emergem da interação entre múltiplas funções e não de relações lineares simples de causa e efeito. De forma semelhante, França et al. (2019) e França et al. (2020) destacam que a compreensão de eventos complexos exige a análise das interações estabelecidas entre diferentes componentes do sistema, permitindo identificar como determinadas condições se combinam e contribuem para a ocorrência de resultados indesejados.

A partir das funções identificadas e dos respectivos acoplamentos, torna-se possível representar de forma integrada a dinâmica funcional do acidente. Assim, a secção seguinte apresenta o modelo FRAM desenvolvido para o Elétrico de Santa Teresa, permitindo visualizar graficamente as relações estabelecidas entre as funções analisadas e compreender de forma sistêmica a evolução do acidente.

4.2.4 Estrutura do Modelo FRAM de Santa Teresa

A Figura 9 apresenta o modelo FRAM desenvolvido para o acidente do Elétrico de Santa Teresa. O modelo foi construído a partir das funções identificadas na análise documental e dos respectivos acoplamentos, permitindo representar de forma integrada as interações existentes entre os diferentes elementos do sistema. A representação gráfica evidencia a estrutura funcional considerada na análise e constitui a base para a avaliação da variabilidade funcional e da ressonância funcional associadas ao acidente.

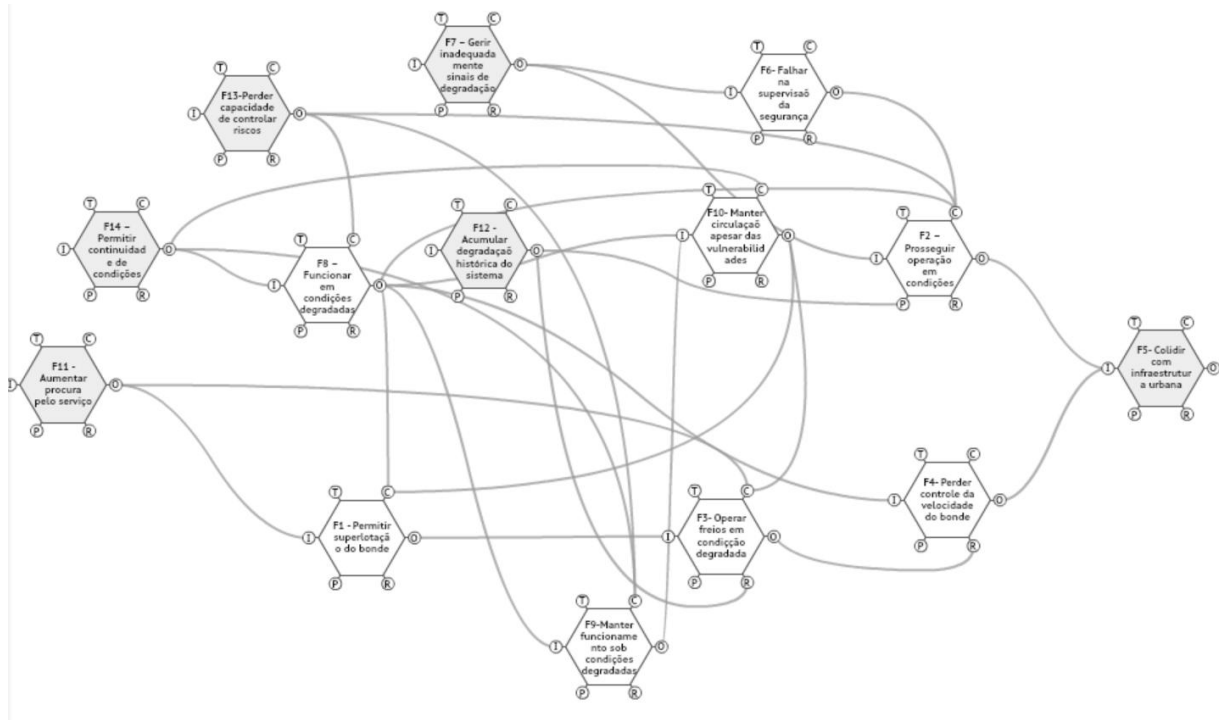


Figura 9 – Modelo FRAM do Elétrico de Santa Teresa

A sua construção baseou-se nas evidências documentais analisadas por Silva (2020) e na organização funcional apresentada nas secções anteriores, procurando representar as diferentes condições e interações que influenciaram o funcionamento do sistema e contribuíram para a ocorrência do acidente.

De acordo com Hollnagel (2012), o objetivo do FRAM não consiste em reproduzir uma sequência linear de acontecimentos nem em identificar uma causa única para o acidente. Em vez disso, o método procura compreender como diferentes funções interagem entre si e de que forma a variabilidade presente no funcionamento do sistema pode contribuir para determinados resultados. Nesta perspetiva, o modelo desenvolvido para o Elétrico de Santa Teresa representa um sistema sociotécnico composto por funções organizacionais, operacionais e técnicas que se influenciam mutuamente. Assim, o modelo não procura explicar o acidente através de uma relação simples de causa e efeito, mas representar a forma como diferentes condições presentes no sistema interagiram ao longo do tempo e contribuíram para a sua evolução.

A organização geral do modelo evidencia uma progressão funcional que se inicia nas condições organizacionais e históricas do sistema.

Neste nível encontram-se as funções associadas à degradação acumulada, à identificação insuficiente dos sinais de deterioração, às limitações na supervisão da segurança e à continuidade de condições de risco já conhecidas. Estas funções representam o contexto em que o sistema operava e constituem a base sobre a qual se desenvolveram as restantes interações representadas no modelo. Embora estas condições não estejam diretamente associadas ao momento do acidente, influenciaram de forma significativa o funcionamento das restantes funções e contribuíram para a persistência de vulnerabilidades no sistema.

A partir deste contexto organizacional emergem as funções relacionadas com a continuidade operacional do serviço. O modelo demonstra que a operação do bonde foi mantida apesar da existência de limitações técnicas e estruturais, exigindo adaptações que permitiram assegurar o funcionamento do sistema em condições progressivamente mais restritivas. Esta dimensão evidencia que a continuidade do serviço não resultou apenas das características técnicas do veículo, mas também da forma como o sistema respondeu às limitações existentes e procurou acomodar as restrições presentes na operação quotidiana.

O modelo integra igualmente funções relacionadas com a procura pelo serviço e com a utilização do bonde. A representação destas funções permite evidenciar que as exigências impostas ao sistema não resultavam apenas das suas condições internas, mas também da intensidade da utilização do serviço.

Neste sentido, a procura pelo bonde e os elevados níveis de ocupação observados em determinados momentos constituem elementos relevantes para compreender o contexto operacional em que o acidente ocorreu, uma vez que influenciavam diretamente as condições de funcionamento do sistema.

A fase final do modelo corresponde à dinâmica imediata do acidente, representada pelas funções associadas à continuidade da operação em condições inseguras, ao funcionamento degradado do sistema de travagem, à perda de controlo da velocidade do veículo e à colisão com a infraestrutura urbana.

A disposição destas funções no modelo evidencia que os eventos observados no momento do acidente constituem apenas a parte mais visível de uma dinâmica funcional mais ampla. Assim, a perda de controlo da velocidade e a colisão não são interpretadas como pontos de partida da análise, mas como consequências da interação entre condições que se desenvolveram progressivamente em diferentes níveis do sistema.

Esta representação é coerente com os princípios fundamentais do FRAM, segundo os quais o desempenho de um sistema resulta da interação entre múltiplas funções e da variabilidade associada ao seu funcionamento (Hollnagel, 2012). Em vez de procurar um único fator explicativo para o acidente, o modelo permite compreender como diferentes condições organizacionais, técnicas e operacionais se combinaram ao longo do tempo, influenciando o comportamento global do sistema. De forma semelhante, França et al. (2019) e França et al. (2020) destacam que a utilização do FRAM em sistemas sociotécnicos complexos possibilita a identificação de interações frequentemente invisíveis em abordagens lineares de análise de acidentes, contribuindo para uma compreensão mais abrangente dos mecanismos que antecedem a ocorrência de eventos indesejados.

Importa ainda salientar que o modelo apresentado não deve ser interpretado como uma representação estática do acidente. Pelo contrário, a sua principal contribuição consiste em evidenciar as relações funcionais estabelecidas entre diferentes componentes do sistema e demonstrar como a interação entre essas funções contribuiu para a evolução da situação analisada.

Neste sentido, a representação gráfica permite visualizar simultaneamente fatores organizacionais, operacionais e técnicos que, quando observados de forma isolada, poderiam não revelar a complexidade da dinâmica que conduziu ao acidente.

A partir da estrutura funcional representada na Figura 9, torna-se possível aprofundar a análise das variações observadas no desempenho das funções e compreender de que forma essas variações se propagaram através dos diferentes acoplamentos do modelo. Assim, a secção seguinte analisa a variabilidade funcional e a ressonância funcional no modelo FRAM do Elétrico de Santa Teresa, procurando compreender como a combinação de diferentes variabilidades contribuiu para a emergência do acidente.

4.2.5 Análise da Variabilidade Funcional

A análise da variabilidade funcional constitui uma etapa essencial da aplicação do Functional Resonance Analysis Method (FRAM), permitindo compreender de que forma diferentes condições presentes no sistema influenciam o desempenho das funções e contribuem para a evolução de situações indesejadas. De acordo com Hollnagel (2012), a variabilidade funcional é uma característica inerente aos sistemas sociotécnicos, uma vez que as funções raramente são executadas exatamente da mesma forma em todas as circunstâncias. As organizações e os

operadores adaptam continuamente o seu desempenho para responder a restrições operacionais, limitações de recursos e exigências do contexto. Neste sentido, a variabilidade não deve ser interpretada exclusivamente como falha ou erro, mas como uma propriedade normal do funcionamento dos sistemas.

No modelo FRAM desenvolvido para o acidente do Elétrico de Santa Teresa, a variabilidade funcional encontra-se distribuída por diferentes níveis organizacionais, operacionais e técnicos. A análise realizada evidencia que as condições que contribuíram para a ocorrência do acidente não estavam concentradas numa única função, mas encontravam-se disseminadas por diferentes componentes do sistema, influenciando progressivamente a forma como as restantes atividades eram executadas.

Uma importante fonte de variabilidade está associada às condições organizacionais e históricas do sistema. Silva (2020) descreve um contexto marcado pelo envelhecimento do bonde, dificuldades de manutenção, limitações estruturais e problemas recorrentes acumulados ao longo do tempo. Estas condições influenciam a forma como o sistema é gerido, supervisionado e mantido, afetando simultaneamente os processos de identificação, avaliação e controlo dos riscos. A permanência de vulnerabilidades já conhecidas contribuiu para criar um contexto organizacional caracterizado por níveis crescentes de incerteza relativamente ao desempenho esperado do sistema.

A variabilidade funcional manifesta-se igualmente nas atividades relacionadas com a supervisão da segurança e com a gestão das condições degradadas. A análise do modelo evidencia que diversos sinais associados ao estado do sistema eram conhecidos antes do acidente, incluindo limitações técnicas, problemas operacionais e ocorrências anteriores. Contudo, a existência destes sinais não se traduziu necessariamente em intervenções capazes de eliminar ou reduzir de forma significativa as vulnerabilidades identificadas. Nesta perspetiva, a variabilidade não decorre apenas da presença de problemas técnicos, mas também da forma como esses problemas são interpretados, acompanhados e integrados nos processos de decisão relacionados com a segurança.

Outra dimensão relevante da variabilidade funcional encontra-se associada à continuidade operacional do sistema. O modelo mostra que o bonde permaneceu em funcionamento apesar da existência de limitações técnicas e operacionais já conhecidas. Conforme refere Hollnagel (2012), os sistemas sociotécnicos recorrem frequentemente a adaptações para assegurar a

continuidade da atividade perante restrições existentes. No caso de Santa Teresa, diferentes ajustamentos operacionais permitiram manter o serviço em funcionamento mesmo num contexto marcado por fragilidades acumuladas ao longo do tempo. Embora estas adaptações contribuíssem para assegurar a prestação do serviço, introduziam simultaneamente novas formas de variabilidade no sistema.

A utilização do serviço constitui igualmente uma fonte relevante de variabilidade funcional. Silva (2020) descreve uma procura elevada pelo transporte e situações de ocupação acima da capacidade prevista. Estas condições aumentavam as exigências impostas ao sistema e influenciavam diretamente o contexto em que as restantes funções eram executadas. A variabilidade associada à utilização não resulta apenas do número de passageiros transportados, mas da forma como essa procura interage com as limitações técnicas e operacionais já existentes, contribuindo para aumentar a complexidade do sistema.

A variabilidade funcional encontra-se também presente nas funções diretamente associadas à operação do bonde e ao desempenho dos seus componentes técnicos. A análise do acidente identifica problemas relacionados com o sistema de travagem, dificuldades de manutenção e funcionamento em condições degradadas. Neste contexto, a variabilidade manifesta-se através das diferenças entre o desempenho esperado dos sistemas de segurança e o desempenho efetivamente observado durante a operação. Estas diferenças não surgem de forma isolada, sendo influenciadas pelas condições organizacionais, operacionais e de utilização anteriormente referidas.

Importa salientar que as diferentes formas de variabilidade identificadas no modelo não devem ser analisadas de forma independente. Conforme defendido por Hollnagel (2012), pequenas variações no desempenho de determinadas funções podem influenciar outras funções através dos respetivos acoplamentos, produzindo efeitos que se propagam pelo sistema. França et al. (2019) e França et al. (2020) demonstram igualmente que a compreensão dos acidentes exige a análise das interações estabelecidas entre múltiplas funções distribuídas por diferentes níveis organizacionais e operacionais. No caso do Elétrico de Santa Teresa, as variabilidades associadas à degradação histórica do sistema, à supervisão da segurança, à continuidade operacional, à utilização do serviço e ao desempenho técnico do veículo coexistiam antes da ocorrência do acidente, influenciando progressivamente as condições em que o sistema operava.

A análise realizada evidencia, assim, que a variabilidade funcional estava distribuída por diferentes componentes do sistema e não associada a uma única atividade ou fator específico. Esta constatação reforça a perspectiva sistêmica proposta pelo FRAM, segundo a qual o comportamento global dos sistemas emerge da interação entre múltiplas funções que operam simultaneamente em diferentes níveis. As variabilidades identificadas não atuaram de forma isolada, influenciando-se mutuamente através dos acoplamentos existentes no modelo. A compreensão destas interações torna-se fundamental para explicar a evolução do acidente, sendo analisada na secção seguinte através do conceito de ressonância funcional.

4.2.6 Análise da Ressonância Funcional

A análise da variabilidade funcional permitiu identificar diferentes fontes de variabilidade distribuídas por várias partes do sistema. No entanto, a compreensão do acidente exige um passo adicional, procurando perceber de que forma essas variabilidades interagiram e influenciaram o desempenho global do sistema. É neste contexto que assume particular relevância o conceito de ressonância funcional proposto por Hollnagel (2012).

Segundo esta perspectiva, os acidentes não resultam necessariamente de uma falha única ou de uma sequência linear de acontecimentos. Em sistemas sociotécnicos complexos, diferentes funções encontram-se permanentemente interligadas e influenciam-se mutuamente. Quando pequenas variações presentes em várias funções convergem e deixam de ser absorvidas pelo sistema, podem gerar consequências mais significativas do que aquelas que cada função produziria isoladamente. Este fenómeno é designado por ressonância funcional.

No caso do Elétrico de Santa Teresa, a análise realizada mostra que o acidente não teve origem num único acontecimento nem pode ser explicado exclusivamente por um problema técnico específico. A dinâmica observada começou a ser construída muito antes da perda de controlo do bonde, através da interação entre condições organizacionais, operacionais e técnicas que permaneceram presentes no sistema ao longo do tempo.

A degradação acumulada do sistema, as dificuldades associadas à supervisão da segurança e a permanência de condições de risco constituíram um contexto favorável à propagação da variabilidade. Estas condições influenciaram a forma como a operação era conduzida diariamente, contribuindo para a continuidade do serviço mesmo perante limitações já conhecidas. Paralelamente, a necessidade de manter a circulação do bonde levou à adoção de

ajustamentos operacionais que permitiram assegurar o funcionamento do sistema, mas que também contribuíram para a manutenção de vulnerabilidades existentes.

A esta realidade juntou-se a elevada procura pelo serviço. A utilização intensa do bonde aumentava as exigências impostas à operação e criava condições mais exigentes para o funcionamento do sistema. Desta forma, variabilidades com origens distintas passaram a coexistir e a influenciar-se mutuamente. O que inicialmente se manifestava como pequenas diferenças no desempenho de determinadas funções foi progressivamente produzindo efeitos noutras partes do sistema.

A fase final desta dinâmica tornou-se visível nas funções relacionadas com a operação do bonde e com o controlo da sua velocidade. Importa salientar que a perda de controlo do veículo não representa o início do acidente. Da mesma forma, as limitações observadas no sistema de travagem não constituem, por si só, uma explicação suficiente para o evento. Estas funções correspondem apenas ao momento em que os efeitos acumulados das variabilidades anteriormente identificadas se tornaram visíveis no funcionamento do sistema.

A Figura 10 apresenta a simulação da propagação da variabilidade realizada através do FRAM Model Visualiser (FMV).

A representação evidencia uma trajetória iniciada na função F11 – Aumentar procura pelo serviço do bonde, seguida pelas funções F1 – Permitir superlotação do bonde, F3 – Operar freios em condição degradada, F4 – Perder controlo da velocidade do bonde e F5 – Colidir o bonde com infraestrutura urbana. Esta sequência não deve ser interpretada como uma cadeia linear de causas e efeitos. Pelo contrário, constitui uma representação da forma como a variabilidade se pode propagar através dos acoplamentos existentes entre funções.

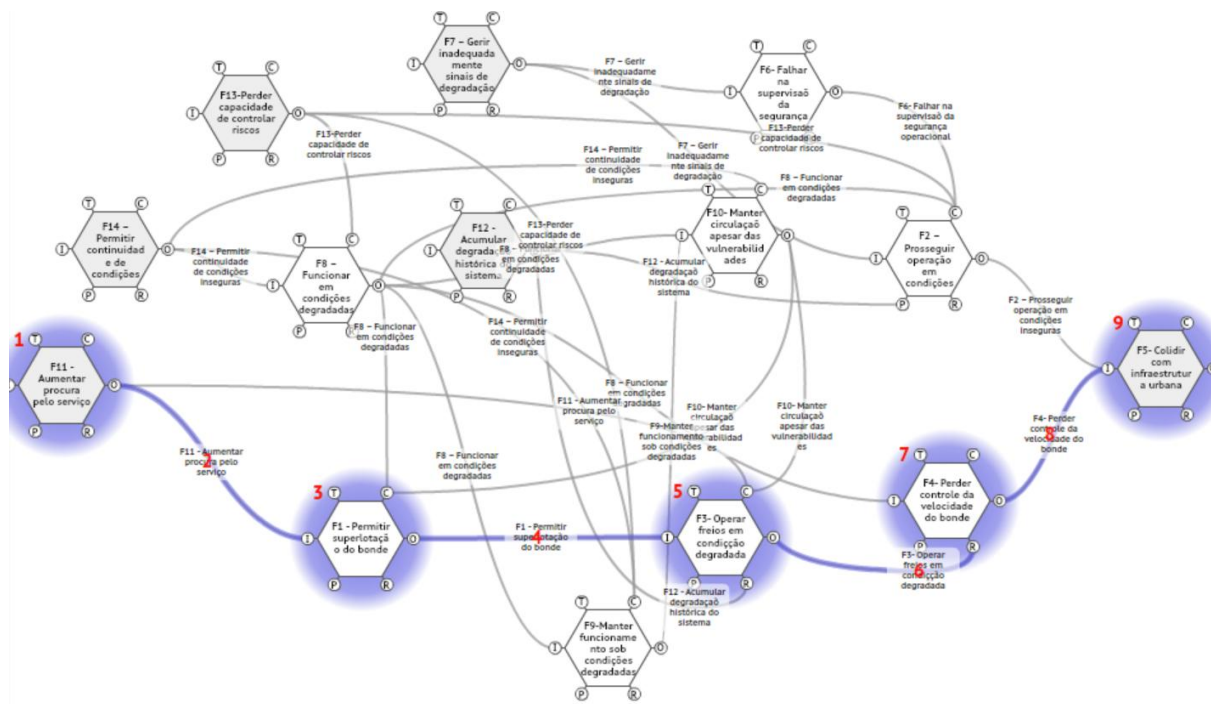


Figura 10 – Simulação da propagação da variabilidade e da ressonância funcional no modelo FRAM do Elétrico de Santa Teresa.

A simulação reforça a interpretação de que a materialização do acidente ocorreu apenas na fase final de um processo mais amplo. As funções representadas no percurso destacado refletem a propagação dos efeitos de condições que se encontravam presentes noutras partes do sistema e que já tinham sido analisadas nas secções anteriores. Assim, a colisão não surge como consequência direta de uma única função, mas como resultado da interação entre múltiplos fatores distribuídos por diferentes níveis organizacionais, operacionais e técnicos.

A análise da ressonância funcional permite, portanto, compreender o acidente do Elétrico de Santa Teresa como um fenómeno emergente. Em vez de procurar uma causa única ou um único responsável pelo evento, o modelo evidencia a importância das interações estabelecidas entre as funções que compõem o sistema. A degradação histórica, as limitações na supervisão da segurança, a continuidade da operação em condições degradadas, a pressão associada à utilização do serviço e os problemas observados durante a operação do bonde contribuíram conjuntamente para criar as condições que possibilitaram a ocorrência do acidente.

Desta forma, o modelo FRAM demonstra que o acidente resultou da combinação de múltiplas variabilidades distribuídas pelo sistema, cuja interação progressiva conduziu à perda de controlo do bonde e à colisão final. Esta interpretação encontra-se alinhada com a abordagem

proposta por Hollnagel (2012) e reforça a importância de compreender os acidentes a partir de uma perspectiva sistémica, centrada nas relações existentes entre funções e não apenas na identificação de falhas isoladas.

5

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O ASCENSOR DA GLÓRIA E O ELÉTRICO SANTA TERESA

5.1 INTRODUÇÃO A ANÁLISE COMPARATIVA

Os capítulos anteriores permitiram analisar, de forma independente, os acidentes do Ascensor da Glória e do Elétrico de Santa Teresa recorrendo à metodologia Functional Resonance Analysis Method (FRAM). Em cada caso, foram identificadas as funções consideradas relevantes para a compreensão da dinâmica do acidente, analisados os respetivos acoplamentos e estudadas as variabilidades funcionais e as interações estabelecidas entre as diferentes funções. Esta análise permitiu compreender de que forma essas interações contribuíram para a propagação da variabilidade e para a emergência dos eventos. A abordagem adotada proporcionou, assim, uma compreensão aprofundada de cada acidente enquanto fenómeno sociotécnico complexo, evidenciando a influência integrada de fatores organizacionais, operacionais e técnicos na evolução das situações analisadas.

Contudo, o principal objetivo desta investigação não consiste apenas na análise individual dos dois acidentes, mas na comparação dos respetivos modelos FRAM, procurando identificar padrões comuns, diferenças relevantes e mecanismos sistémicos que contribuíram para a ocorrência dos eventos. Neste sentido, a análise comparativa constitui uma etapa fundamental da investigação, uma vez que permite ultrapassar a compreensão isolada de cada caso e explorar características partilhadas entre sistemas distintos de transporte de passageiros.

De acordo com Hollnagel (2012), a utilização do FRAM permite compreender acidentes através da análise das interações estabelecidas entre funções e não apenas através da identificação de falhas individuais ou relações lineares de causa e efeito. Nesta perspectiva, a comparação entre os dois casos não procura determinar qual acidente apresentou maior gravidade ou identificar um fator causal predominante, mas compreender de que forma diferentes combinações de condições organizacionais, operacionais e técnicas contribuíram para a emergência dos eventos analisados.

A relevância desta abordagem tem sido igualmente destacada em diferentes aplicações do FRAM desenvolvidas por França et al. (2019) e França et al. (2020), nas quais a análise das interações entre funções permitiu identificar mecanismos de propagação da variabilidade frequentemente invisíveis em abordagens tradicionais de investigação de acidentes. Assim, a comparação entre os modelos desenvolvidos para o Ascensor da Glória e para o Elétrico de Santa Teresa procura explorar não apenas as diferenças entre os dois sistemas, mas também os elementos comuns que podem contribuir para uma compreensão mais abrangente da segurança em sistemas de transporte de passageiros.

A análise comparativa será desenvolvida através da comparação das condições organizacionais e históricas, das condições operacionais, das características associadas à utilização dos sistemas e dos mecanismos de variabilidade e ressonância funcional identificados em cada caso. A partir desta estrutura, pretende-se compreender de que forma os dois acidentes evoluíram, quais os padrões sistêmicos observados e que contributos a aplicação do FRAM proporcionou para a interpretação dos eventos analisados.

5.2 COMPARAÇÃO DAS CONDIÇÕES ORGANIZACIONAIS E HISTÓRICAS

A análise comparativa dos dois acidentes evidencia que, apesar das diferenças técnicas existentes entre o Ascensor da Glória e o Elétrico de Santa Teresa, ambos os sistemas apresentavam condições organizacionais e históricas que contribuíram para a criação e manutenção de vulnerabilidades persistentes ao longo do tempo. Nos dois casos, os modelos FRAM permitiram identificar funções associadas à supervisão da segurança, à gestão das condições degradadas e à permanência de situações de risco que influenciaram o desempenho global dos sistemas antes da ocorrência dos acidentes.

No caso do Ascensor da Glória, o modelo evidencia a importância das funções relacionadas com o enquadramento legal e a supervisão técnica do sistema. O Relatório do GPIAAF (2025) refere limitações associadas ao contexto regulatório aplicável ao ascensor e à inexistência de mecanismos independentes de supervisão técnica capazes de identificar e corrigir determinadas vulnerabilidades existentes no sistema. Estas condições encontram-se representadas principalmente pelas funções F14 – Aplicar enquadramento legal e supervisão técnica insuficientes e F13 – Falhar na deteção de condições degradadas, as quais evidenciam limitações na identificação e correção atempada de vulnerabilidades presentes no sistema. Em conjunto, estas funções demonstram dificuldades na deteção de incompatibilidades técnicas, na monitorização da degradação progressiva dos componentes e na eficácia dos mecanismos de controlo existentes.

Por sua vez, no Elétrico de Santa Teresa, as condições organizacionais assumem uma configuração distinta, embora conduzam a resultados semelhantes. As funções F12 – Acumular degradação histórica do sistema, F7 – Ignorar sinais de degradação do sistema, F6 – Falhar na supervisão da segurança e F13 – Aceitar continuidade de condições de risco representam um contexto marcado pelo envelhecimento progressivo do sistema, pela persistência de problemas conhecidos e pela dificuldade em implementar medidas eficazes capazes de eliminar ou reduzir as vulnerabilidades existentes.

Enquanto no Ascensor da Glória o foco principal recai sobre limitações associadas à supervisão técnica, à inspeção e ao enquadramento regulatório, no caso de Santa Teresa destaca-se a degradação histórica do sistema e a permanência de condições inseguras previamente conhecidas e não eliminadas. Apesar destas diferenças, ambos os modelos revelam um padrão comum: as vulnerabilidades que contribuíram para os acidentes não surgiram imediatamente antes dos eventos, mas desenvolveram-se progressivamente ao longo do tempo.

Em ambos os casos, os modelos FRAM evidenciam que determinadas condições degradadas permaneceram ativas durante períodos prolongados sem que fossem implementadas medidas suficientemente eficazes para interromper a sua evolução. Esta constatação reforça a importância das funções organizacionais na compreensão dos acidentes, demonstrando que os eventos analisados não podem ser explicados exclusivamente através das falhas observadas na fase final da dinâmica accidental.

Outra semelhança relevante diz respeito à capacidade de detecção das condições degradadas. No Ascensor da Glória, a investigação identificou limitações associadas aos processos de inspeção, manutenção e verificação técnica, que contribuíram para que incompatibilidades e degradações estruturais não fossem identificadas atempadamente. De forma semelhante, no Elétrico de Santa Teresa, as evidências documentais apontam para a existência de sinais prévios de degradação, problemas recorrentes e condições de risco que permaneceram presentes no sistema antes do acidente. Embora os mecanismos específicos sejam diferentes, ambos os casos revelam dificuldades na transformação dos sinais disponíveis em ações corretivas capazes de impedir a evolução das vulnerabilidades.

A comparação das condições organizacionais e históricas permite, assim, identificar um padrão sistêmico comum aos dois acidentes: a presença de condições degradadas persistentes que se desenvolveram ao longo do tempo e influenciaram progressivamente o desempenho das restantes funções do sistema. Embora os mecanismos específicos difiram entre os casos, ambos os modelos demonstram que as condições organizacionais constituíram uma base importante para a propagação da variabilidade funcional observada posteriormente. Esta conclusão reforça a perspectiva de Hollnagel (2012) de que os acidentes emergem de interações distribuídas pelo sistema e não apenas de falhas localizadas ou eventos imediatamente anteriores à sua ocorrência.

A partir destas condições organizacionais e históricas, torna-se possível analisar de que forma os dois sistemas responderam operacionalmente às limitações existentes. Assim, a secção seguinte compara as condições operacionais identificadas nos modelos FRAM do Ascensor da Glória e do Elétrico de Santa Teresa, procurando compreender como a continuidade da atividade foi mantida apesar das vulnerabilidades presentes em cada sistema.

5.3 COMPARAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS

Para além das semelhanças observadas ao nível das condições organizacionais e históricas, os modelos FRAM desenvolvidos para o Ascensor da Glória e para o Elétrico de Santa Teresa evidenciam igualmente a importância das condições operacionais na evolução dos acidentes. Em ambos os casos, a continuidade da atividade foi mantida apesar da existência de limitações previamente identificadas, permitindo que vulnerabilidades acumuladas se propagassem para funções diretamente relacionadas com a materialização dos eventos.

No modelo do Ascensor da Glória, as condições operacionais encontram-se representadas principalmente pelas funções associadas à manutenção, inspeção e utilização do cabo ao longo do tempo. As funções F6 – Executar manutenção insuficiente do sistema e F7 – Inspeccionar inadequadamente a zona crítica evidenciam limitações nos mecanismos de acompanhamento das condições do cabo, enquanto as funções F8 – Submeter o cabo a esforços contínuos e F9 – Agravar degradação estrutural do cabo representam o processo gradual de deterioração associado à sua permanência em serviço. Neste caso, a continuidade operacional manifesta-se através da utilização prolongada de um componente cuja degradação evoluiu progressivamente sem que fossem identificadas ou corrigidas todas as condições que contribuíram para o seu enfraquecimento.

No Elétrico de Santa Teresa, a continuidade operacional assume uma configuração distinta. As funções F8 – Funcionar o bonde em condições degradadas, F9 – Adaptar a operação para continuar o serviço e F10 – Manter circulação do bonde apesar das vulnerabilidades representam um sistema que permaneceu em funcionamento apesar das limitações técnicas e organizacionais existentes. As evidências documentais analisadas sugerem que diferentes ajustamentos operacionais permitiram assegurar a continuidade do serviço, mesmo num contexto marcado por dificuldades de manutenção, envelhecimento do veículo e problemas recorrentes associados ao sistema de transporte.

Apesar das diferenças técnicas entre os dois sistemas, ambos os modelos evidenciam um padrão comum: a manutenção da atividade perante condições que se afastavam progressivamente daquelas consideradas desejáveis para uma operação segura. Em nenhum dos casos a continuidade operacional pode ser interpretada como resultado de uma única decisão isolada. Pelo contrário, ela emerge da interação entre diferentes funções e da necessidade de responder às exigências do sistema perante recursos limitados, restrições técnicas e condicionantes operacionais.

Outra semelhança relevante diz respeito ao papel das adaptações operacionais. Embora estas adaptações assumam formas distintas em cada caso, ambas refletem a capacidade dos sistemas para continuar a funcionar perante dificuldades existentes. Conforme referido por Hollnagel (2012), os sistemas sociotécnicos dependem frequentemente de ajustamentos e adaptações para assegurar o seu funcionamento.

Contudo, as mesmas adaptações que permitem manter a atividade podem também contribuir para a propagação de variabilidades e vulnerabilidades para outras partes do sistema. Esta característica encontra-se claramente presente nos dois acidentes analisados.

Observa-se, contudo, uma diferença importante entre os casos. No Ascensor da Glória, a degradação operacional encontra-se fortemente associada ao comportamento de um componente crítico específico — o cabo de tração — cuja deterioração progressiva desempenha um papel central na dinâmica do acidente. Em Santa Teresa, por outro lado, as vulnerabilidades operacionais distribuem-se por diferentes elementos do sistema, envolvendo o estado geral do veículo, a continuidade da circulação e as adaptações realizadas para manter o serviço em funcionamento. Assim, enquanto o modelo do Ascensor da Glória evidencia uma maior concentração da variabilidade operacional num componente técnico específico, o modelo do Elétrico de Santa Teresa revela uma distribuição mais ampla dessa variabilidade pelas atividades operacionais do sistema.

Em ambos os casos, as condições operacionais funcionaram como um mecanismo de ligação entre as vulnerabilidades organizacionais previamente existentes e os eventos que culminaram nos acidentes. Esta constatação reforça a importância de compreender a segurança não apenas através da análise de componentes técnicos isolados, mas também através da forma como os sistemas mantêm o seu funcionamento perante restrições e limitações.

A partir desta perspetiva, torna-se possível analisar de que forma a utilização dos sistemas e as exigências associadas ao transporte de passageiros contribuíram para aumentar a variabilidade funcional observada nos dois acidentes.

5.4 COMPARAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO SISTEMA

A análise comparativa dos dois acidentes evidencia que a utilização dos sistemas desempenhou papéis distintos na dinâmica dos eventos. Embora tanto o Ascensor da Glória como o Elétrico de Santa Teresa fossem sistemas de transporte de passageiros inseridos em contextos urbanos, a influência exercida pela procura do serviço e pelos níveis de ocupação revelou diferenças significativas nos respetivos modelos FRAM.

No caso do Elétrico de Santa Teresa, a utilização do sistema constitui um elemento relevante para a compreensão da dinâmica do acidente. O modelo desenvolvido inclui explicitamente as funções F11 – Aumentar procura pelo serviço do bonde e F1 – Permitir superlotação do bonde, representando a influência da elevada procura e da ocupação do bonde nas condições operacionais do sistema.

As evidências apresentadas por Silva (2020) indicam que o veículo envolvido no acidente transportava um número de passageiros superior à capacidade prevista, situação que contribuiu para aumentar as exigências impostas ao sistema e intensificou as condições de operação existentes. Neste contexto, a utilização do serviço não é interpretada como uma causa isolada do acidente, mas como um fator que introduziu variabilidade adicional num sistema já caracterizado por vulnerabilidades organizacionais e operacionais.

Por outro lado, no modelo do Ascensor da Glória, a utilização do sistema não surge como um elemento central da dinâmica accidental. A investigação preliminar do GPIAAF (2025) concentra-se sobretudo em aspetos relacionados com a aquisição, inspeção, manutenção e degradação do cabo de tração, não destacando a procura pelo serviço ou a ocupação das cabinas como fatores relevantes para a compreensão do acidente. Assim, ao contrário do observado em Santa Teresa, a utilização do sistema assume uma expressão menos evidente na propagação da variabilidade funcional identificada no modelo.

Esta diferença evidencia uma das principais particularidades entre os dois acidentes. No Elétrico de Santa Teresa, a interação entre procura, ocupação do veículo e condições operacionais contribuiu para aumentar a complexidade do sistema e reforçar a propagação da variabilidade funcional. No Ascensor da Glória, pelo contrário, a dinâmica do acidente encontra-se associada principalmente a fatores técnicos, organizacionais e de manutenção, sem que a intensidade de utilização do sistema assumia um papel comparável ao identificado em Santa Teresa.

Apesar desta diferença, existe um elemento comum que merece destaque. Em ambos os casos, os sistemas continuavam a desempenhar funções relevantes para a mobilidade urbana e permaneciam em operação regular no momento do acidente. Esta continuidade de utilização evidencia que os serviços continuavam a ser utilizados no quotidiano, apesar da existência de vulnerabilidades que vieram a revelar-se relevantes para a ocorrência dos acidentes.

Embora esta situação não tenha produzido os mesmos efeitos nos dois modelos, demonstra que as condições degradadas existentes não impediram a continuidade da prestação do serviço.

Deste modo, a análise comparativa demonstra que a utilização dos sistemas desempenhou um papel significativamente mais relevante no acidente do Elétrico de Santa Teresa do que no acidente do Ascensor da Glória. Esta diferença constitui um dos aspetos que distinguem os dois modelos FRAM, evidenciando que a variabilidade funcional pode emergir de fontes distintas consoante as características do sistema analisado e as condições específicas em que o acidente ocorre.

Apesar destas diferenças, os dois casos revelam que a materialização dos acidentes não pode ser explicada exclusivamente por fatores associados à utilização dos sistemas. Em ambos os modelos, a dinâmica accidental resulta da interação entre múltiplas funções distribuídas pelos níveis organizacional, operacional e técnico. Neste contexto, torna-se fundamental comparar a forma como a variabilidade funcional se propagou em cada caso e como os diferentes mecanismos de ressonância funcional contribuíram para a emergência dos acidentes. Essa análise é desenvolvida na secção seguinte.

5.5 COMPARAÇÃO DOS MECANISMOS DE RESSONÂNCIA FUNCIONAL

A análise comparativa dos dois acidentes evidencia que a materialização dos eventos não resultou de uma falha isolada ou de uma única condição insegura, mas da interação entre múltiplas funções distribuídas pelos diferentes níveis dos sistemas sociotécnicos analisados. Esta constatação encontra-se em consonância com os princípios da metodologia FRAM, segundo os quais os acidentes emergem da combinação e da amplificação de variabilidades funcionais que, em determinadas circunstâncias, se reforçam mutuamente até produzirem resultados inesperados (Hollnagel, 2012).

Nos dois casos estudados, a propagação da variabilidade funcional ocorreu de forma progressiva, envolvendo funções de natureza organizacional, operacional e técnica. Contudo, apesar desta semelhança estrutural, os percursos de propagação da variabilidade apresentaram características distintas.

No Ascensor da Glória, a variabilidade funcional desenvolveu-se principalmente em torno de questões relacionadas com a aquisição, aceitação, utilização e monitorização do cabo de tração. As limitações identificadas ao nível da supervisão técnica, da deteção de condições degradadas e do enquadramento regulatório contribuíram para criar condições favoráveis à permanência de incompatibilidades técnicas no sistema. À medida que estas variabilidades se propagavam entre as diferentes funções, reduzia-se progressivamente a capacidade do sistema para identificar e corrigir as vulnerabilidades existentes antes da ocorrência do acidente.

No caso do Elétrico de Santa Teresa, a propagação da variabilidade funcional apresentou uma configuração distinta. O processo desenvolveu-se num contexto caracterizado pela degradação progressiva do sistema, pela continuidade da operação em condições adversas e pela persistência de problemas conhecidos ao longo do tempo. Neste cenário, a variabilidade funcional não se concentrou num único componente ou processo específico, mas distribuiu-se por diversas funções relacionadas com a gestão da segurança, a supervisão, a manutenção das condições operacionais e a resposta às limitações existentes. Como resultado, as adaptações realizadas para garantir a continuidade do serviço contribuíram para reforçar vulnerabilidades já presentes no sistema.

Apesar destas diferenças, ambos os modelos revelam um padrão comum de acumulação gradual de variabilidade. Em nenhum dos casos a dinâmica accidental pode ser explicada exclusivamente pelas condições observadas imediatamente antes do evento final. Pelo contrário, os modelos demonstram que as condições que contribuíram para os acidentes foram sendo construídas progressivamente através da interação entre diferentes funções. Esta característica constitui um dos aspetos centrais da abordagem FRAM, uma vez que permite compreender os acidentes como fenómenos emergentes resultantes da variabilidade normal do desempenho dos sistemas.

A análise comparativa evidencia igualmente que as funções organizacionais desempenharam um papel determinante na propagação da variabilidade funcional. Tanto no Ascensor da Glória como no Elétrico de Santa Teresa, as decisões, práticas e limitações presentes nos níveis organizacionais influenciaram funções operacionais e técnicas que, posteriormente, participaram na dinâmica dos acidentes. Esta constatação reforça a importância de considerar os diferentes níveis do sistema de forma integrada, evitando interpretações centradas exclusivamente nos operadores ou nos componentes diretamente envolvidos nos eventos.

De forma semelhante, as funções operacionais assumiram um papel relevante na transmissão e amplificação da variabilidade. Em ambos os casos, a continuidade da operação ocorreu em contextos onde determinadas limitações já estavam presentes. Embora os mecanismos específicos fossem distintos, as condições operacionais existentes contribuíram para criar ligações entre diferentes variabilidades funcionais, favorecendo a sua propagação através do sistema. Assim, a variabilidade observada não permaneceu confinada a uma única função, mas foi progressivamente transferida para outras funções com as quais mantinha relações de dependência.

Ao nível técnico, os dois acidentes também evidenciam a importância das interações entre componentes físicos, processos de manutenção e mecanismos de controlo. No entanto, enquanto o modelo do Ascensor da Glória destaca sobretudo questões relacionadas com o cabo de tração e com os processos associados à sua utilização e monitorização, o modelo de Santa Teresa evidencia um conjunto mais amplo de limitações técnicas inseridas num contexto de degradação histórica do sistema. Esta diferença demonstra que a propagação da variabilidade funcional pode assumir configurações distintas consoante as características específicas do sistema analisado.

A comparação dos mecanismos de ressonância funcional permite aprofundar esta análise. Nos dois casos, a ressonância não resultou da amplificação de uma única variabilidade, mas da convergência de múltiplas variabilidades provenientes de funções diferentes. À medida que estas variabilidades interagem, os seus efeitos acumulavam-se e reforçavam-se mutuamente, reduzindo a capacidade do sistema para absorver perturbações ou recuperar de condições degradadas. Desta forma, os acidentes emergiram quando a combinação destas variabilidades ultrapassou a capacidade de controlo existente nos respetivos sistemas.

No Ascensor da Glória, a ressonância funcional encontra-se associada sobretudo à interação entre variabilidades relacionadas com a gestão do cabo, a supervisão técnica, a deteção de condições degradadas e os mecanismos de controlo disponíveis. Já em Santa Teresa, a ressonância funcional desenvolveu-se através da combinação entre degradação histórica, limitações na gestão da segurança, persistência de condições de risco e exigências operacionais associadas ao funcionamento do sistema. Embora os percursos sejam distintos, ambos os casos demonstram que a emergência dos acidentes resultou da combinação de múltiplas condições que se reforçaram progressivamente ao longo do tempo.

Esta perspetiva distingue-se das abordagens lineares tradicionais de análise de acidentes, que procuram identificar cadeias simples de causa e efeito ou apontar uma única origem para os eventos. Em consonância com Hollnagel (2012), os modelos desenvolvidos evidenciam que os acidentes analisados devem ser compreendidos como fenómenos emergentes produzidos por interações distribuídas ao longo dos sistemas sociotécnicos. A utilização do FRAM permitiu, assim, compreender não apenas o que aconteceu, mas também de que forma diferentes variabilidades funcionais se combinaram até originarem os resultados observados.

Em síntese, a comparação da propagação da variabilidade funcional e da ressonância funcional demonstra que, apesar das diferenças técnicas e operacionais existentes entre os dois sistemas, ambos os acidentes emergiram de processos sistémicos caracterizados pela acumulação progressiva de variabilidades e pela interação entre funções organizacionais, operacionais e técnicas. Esta constatação constitui um dos principais contributos da aplicação da metodologia FRAM aos casos analisados e fornece uma base sólida para a síntese comparativa apresentada na secção seguinte, dedicada à discussão integrada dos resultados e dos contributos da abordagem para a compreensão dos acidentes estudados.

Em síntese, a comparação da propagação da variabilidade funcional e da ressonância funcional demonstra que, apesar das diferenças técnicas e operacionais existentes entre os dois sistemas, ambos os acidentes são interpretados, à luz da metodologia FRAM, como fenómenos emergentes resultantes da acumulação progressiva de variabilidades e da interação entre funções organizacionais, operacionais e técnicas distribuídas pelos diferentes níveis dos respetivos sistemas sociotécnicos.

A aplicação do FRAM permitiu identificar estes mecanismos de forma integrada, evidenciando padrões que dificilmente seriam observados através de abordagens lineares centradas em causas isoladas. Com base nestes resultados, o capítulo seguinte apresenta as principais conclusões da investigação, as suas limitações e os contributos do estudo para a análise da segurança em sistemas de transporte de passageiros.

6

CONCLUSÕES

6.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES DA INVESTIGAÇÃO

A presente investigação teve como objetivo analisar comparativamente dois acidentes ocorridos em sistemas de transporte de passageiros — o acidente do Ascensor da Glória, em Lisboa, e o acidente do Elétrico de Santa Teresa, no Rio de Janeiro — recorrendo à metodologia Functional Resonance Analysis Method (FRAM). A aplicação desta abordagem permitiu compreender as interações entre funções, os mecanismos de propagação da variabilidade funcional e os processos de ressonância funcional que contribuíram para a emergência dos acidentes, identificando padrões sistêmicos dificilmente evidenciados por métodos de análise centrados exclusivamente em falhas técnicas ou erros humanos.

A análise desenvolvida demonstrou que, apesar das diferenças técnicas, operacionais e contextuais existentes entre os dois sistemas, os acidentes analisados são interpretados, à luz da metodologia FRAM, como fenómenos emergentes resultantes da interação entre múltiplas funções distribuídas pelos níveis organizacional, operacional e técnico. Em nenhum dos casos foi possível identificar uma única causa responsável pela ocorrência do evento. Pelo contrário, os resultados evidenciam que a acumulação progressiva de condições degradadas, a propagação da variabilidade funcional e as interações estabelecidas entre as diferentes funções favoreceram a emergência dos acidentes.

No caso do Ascensor da Glória, a análise evidenciou a relevância de fatores associados à gestão do cabo de tração, à supervisão técnica, aos processos de inspeção e à deteção de condições degradadas. A interação entre estas funções contribuiu para a permanência de vulnerabilidades no sistema, reduzindo progressivamente a sua capacidade de identificar e corrigir situações potencialmente perigosas.

No caso do Elétrico de Santa Teresa, os resultados revelaram a importância da degradação histórica do sistema, da continuidade da operação em condições adversas, das limitações na gestão da segurança e da permanência de condições de risco ao longo do tempo. A análise demonstrou igualmente que a elevada procura pelo serviço e a superlotação do veículo contribuíram para aumentar as exigências operacionais impostas ao sistema, potenciando os efeitos das vulnerabilidades existentes.

A comparação dos dois modelos FRAM permitiu identificar semelhanças relevantes na forma como a variabilidade funcional se propagou. Em ambos os casos, verificou-se que pequenas variabilidades presentes em diferentes funções foram progressivamente amplificadas através das interações existentes entre os elementos do sistema. Esta propagação culminou em mecanismos de ressonância funcional que contribuíram para a emergência dos acidentes.

Os resultados obtidos reforçam os princípios teóricos propostos por Hollnagel (2012), segundo os quais os acidentes em sistemas sociotécnicos complexos não devem ser interpretados como consequências lineares de falhas isoladas, mas como fenómenos emergentes resultantes da interação entre múltiplos fatores, perspetiva que continua a ser corroborada por aplicações recentes da metodologia FRAM (Tierra-Arévalo et al., 2024; Peng, Zhen & Huang, 2023).

Conclui-se, assim, que a segurança de sistemas de transporte de passageiros depende não apenas da fiabilidade dos seus componentes técnicos, mas também da forma como as funções organizacionais, operacionais e técnicas interagem ao longo do tempo. A compreensão destas interações constitui um elemento fundamental para a identificação de vulnerabilidades sistêmicas e para o desenvolvimento de estratégias de prevenção mais eficazes.

De forma geral, a investigação demonstrou que a aplicação do FRAM permitiu obter uma compreensão mais abrangente dos acidentes analisados, evidenciando a utilidade da abordagem para o estudo de sistemas sociotécnicos complexos e para a promoção de uma perspetiva sistêmica da segurança.

6.2 CONTRIBUTOS DA INVESTIGAÇÃO

A presente investigação contribui para o aprofundamento do conhecimento sobre a aplicação da metodologia Functional Resonance Analysis Method (FRAM) na análise de acidentes ocorridos em sistemas de transporte de passageiros. Através da comparação entre os acidentes do Ascensor da Glória e do Elétrico de Santa Teresa, foi possível demonstrar a utilidade da abordagem para a compreensão de eventos complexos que envolvem interações entre fatores organizacionais, operacionais e técnicos.

Um dos principais contributos do estudo consiste na demonstração de que acidentes aparentemente distintos podem apresentar padrões sistêmicos semelhantes quando analisados através de uma perspetiva funcional. Apesar das diferenças existentes entre os dois sistemas, os modelos desenvolvidos evidenciaram mecanismos comuns relacionados com a acumulação de condições degradadas, a propagação da variabilidade funcional e a emergência de fenómenos de ressonância funcional.

A investigação contribui igualmente para a aplicação prática dos princípios da Safety-II no contexto da segurança dos transportes. Ao invés de procurar uma única causa ou um único responsável pelos acidentes, a análise permitiu compreender como diferentes funções interagem e se influenciam mutuamente ao longo do tempo. Esta perspetiva favorece uma compreensão mais abrangente dos processos que conduzem aos acidentes e apoia o desenvolvimento de estratégias de prevenção orientadas para o sistema como um todo.

Outro contributo relevante reside na construção e aplicação de modelos FRAM para dois sistemas históricos de transporte urbano de passageiros. Os modelos desenvolvidos permitiram representar de forma estruturada as interações existentes entre diferentes funções e evidenciar o papel das condições organizacionais e operacionais na dinâmica dos acidentes. Desta forma, o estudo fornece exemplos concretos de aplicação da metodologia que poderão servir de referência para futuras investigações em contextos semelhantes.

A comparação realizada permitiu ainda evidenciar a importância da monitorização das condições degradadas e da identificação precoce de sinais de vulnerabilidade em sistemas sociotécnicos complexos. Os resultados demonstram que muitas das condições que contribuíram para os acidentes já estavam presentes antes da ocorrência dos eventos, reforçando a necessidade de abordagens preventivas capazes de identificar e controlar a variabilidade funcional antes que esta se propague pelo sistema.

Por fim, a investigação contribui para a disseminação da metodologia FRAM no domínio da Engenharia de Segurança do Trabalho e Higiene Ocupacionais, evidenciando o seu potencial como ferramenta de análise, aprendizagem organizacional e apoio à gestão da segurança. A aplicação da metodologia permitiu ultrapassar limitações frequentemente associadas a abordagens lineares de investigação de acidentes, proporcionando uma compreensão mais integrada e sistémica dos fenómenos analisados.

Em síntese, os contributos deste estudo ultrapassam a análise específica dos acidentes investigados, oferecendo elementos relevantes para a compreensão da segurança em sistemas de transporte de passageiros e reforçando a utilidade do FRAM como instrumento de apoio à análise de sistemas sociotécnicos complexos.

6.3 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Apesar dos contributos obtidos, a presente investigação apresenta algumas limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados.

A primeira limitação está relacionada com a natureza das fontes documentais utilizadas. A análise do acidente do Ascensor da Glória baseou-se no Relatório Preliminar do GPIAAF (2025), uma vez que, à data de realização da investigação, o relatório final ainda não se encontrava disponível. Consequentemente, algumas conclusões apresentadas refletem o estado da informação disponível no momento da elaboração da dissertação e poderão ser complementadas ou ajustadas à luz de futuras evidências decorrentes da investigação oficial.

Uma segunda limitação decorre da própria natureza qualitativa da metodologia FRAM. Embora a abordagem permita compreender de forma aprofundada as interações entre funções e os mecanismos de propagação da variabilidade funcional, a construção dos modelos envolve necessariamente um processo interpretativo por parte do investigador. Assim, diferentes investigadores poderão identificar funções, acoplamentos ou níveis de detalhe distintos, sem que isso invalide os princípios fundamentais da metodologia.

Outra limitação relaciona-se com a disponibilidade e profundidade da informação existente para cada estudo de caso. Os modelos desenvolvidos dependem da qualidade e do nível de detalhe das fontes analisadas. Desta forma, algumas funções ou interações poderão não ter sido representadas caso não existissem evidências documentais suficientes que permitissem a sua caracterização de forma rigorosa.

Importa igualmente referir que a investigação incidiu apenas sobre dois acidentes específicos ocorridos em sistemas de transporte de passageiros. Embora a comparação realizada tenha permitido identificar padrões relevantes e contributos importantes para a compreensão da segurança em sistemas sociotécnicos complexos, os resultados não devem ser generalizados de forma automática para todos os sistemas de transporte ou para outros contextos operacionais sem a devida análise das suas particularidades.

Adicionalmente, a construção dos modelos FRAM baseou-se exclusivamente na análise documental dos casos estudados. Não foi possível complementar a investigação com entrevistas, observações diretas ou consultas a profissionais envolvidos na operação e manutenção dos sistemas analisados. A integração destas fontes poderia ter contribuído para uma compreensão mais detalhada de determinadas atividades, decisões e interações presentes no funcionamento real dos sistemas.

Por fim, importa reconhecer que os modelos desenvolvidos representam uma simplificação da realidade. Tal como referido por Hollnagel (2012), qualquer modelo constitui uma representação parcial de um sistema complexo e não a sua reprodução integral. Assim, embora os modelos FRAM tenham permitido identificar relações e mecanismos relevantes para a compreensão dos acidentes, não esgotam todas as possíveis interpretações dos eventos estudados.

Apesar destas limitações, considera-se que os objetivos da investigação foram alcançados e que os resultados obtidos fornecem uma contribuição válida para a compreensão dos acidentes analisados e para a aplicação da metodologia FRAM no domínio da segurança de sistemas de transporte de passageiros.

6.4 RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos nesta investigação evidenciam o potencial da metodologia FRAM para a análise de acidentes em sistemas de transporte de passageiros e abrem oportunidades para o desenvolvimento de estudos futuros nesta área.

Uma primeira recomendação consiste na aplicação da metodologia a outros acidentes ocorridos em diferentes sistemas de transporte de passageiros. A realização de estudos envolvendo um maior número de casos poderá contribuir para a identificação de padrões sistémicos comuns e para o aprofundamento do conhecimento sobre os mecanismos de propagação da variabilidade funcional em sistemas sociotécnicos complexos.

Outra possibilidade de investigação futura consiste na aplicação do FRAM numa perspetiva preventiva, orientada para a identificação e gestão de condições degradadas antes da ocorrência de acidentes. A utilização da metodologia como ferramenta de apoio à gestão da segurança poderá contribuir para a deteção precoce de vulnerabilidades e para o reforço da capacidade dos sistemas para responder a perturbações operacionais.

No caso específico do Ascensor da Glória, recomenda-se a realização de estudos complementares após a publicação do relatório final do GPIAAF. A disponibilização de novas informações poderá permitir aprofundar a compreensão dos fatores envolvidos no acidente e avaliar de que forma os resultados obtidos nesta investigação se relacionam com as conclusões finais da entidade responsável pela investigação.

Adicionalmente, futuras investigações poderão explorar a utilização do FRAM em conjunto com dados operacionais, históricos de manutenção e informações provenientes da exploração dos sistemas. Esta abordagem poderá contribuir para uma representação mais detalhada das interações funcionais e para uma melhor compreensão dos processos que antecedem a ocorrência de acidentes.

Por fim, recomenda-se a expansão da aplicação da metodologia FRAM no domínio da Engenharia de Segurança do Trabalho e Higiene Ocupacionais, não apenas na investigação de acidentes, mas também na análise de atividades complexas e na avaliação de sistemas sociotécnicos. A crescente complexidade das organizações modernas exige abordagens capazes de compreender as interações entre fatores humanos, organizacionais e tecnológicos, constituindo o FRAM uma ferramenta relevante para apoiar a gestão da segurança.

As recomendações apresentadas procuram contribuir para o desenvolvimento de futuras investigações e para o aprofundamento do conhecimento sobre a segurança em sistemas de transporte de passageiros, reforçando simultaneamente o potencial da abordagem sistémica na prevenção de acidentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bruzi, M. C.; Arcuri, R.; Bellas, H. C.; Vianna, J.; dos Santos, L.; Moraes, A. S. (2025). *The Impact of Performance Variability on Access to Healthcare: An Analysis of Regional Referral Centers' Resilience*. *Ciência & Saúde Coletiva*, 30(6), e04542025.
- Carris – Companhia Carris de Ferro de Lisboa. (2025). Os nossos números. <https://www.carris.pt/a-carris/empresa/os-nossos-numeros>
- dos Santos, L.; Arcuri, R.; Cançado, R.; Burns, C.; de Carvalho, P. V. R.; Vidal, M. C. (2025). *A Context-Sensitive Approach for Variability Analysis in Complex Sociotechnical Systems*. *Safety Science*, 191, 106940. Elsevier, Amsterdam.
- França, J. E. M.; Hollnagel, E.; Santos, I. J. A. L.; Haddad, A. N. (2019). *FRAM AHP approach to analyse offshore oil well drilling and construction focused on human factors*. *Cognition, Technology & Work*, 21, 373–392. Springer-Verlag London Ltd., London.
- França, J. E. M.; Hollnagel, E.; Santos, I. J. A. L.; Haddad, A. N. (2020). *Analysing human factors and non-technical skills in offshore drilling operations using FRAM (Functional Resonance Analysis Method)*. *Cognition, Technology & Work*, 22, 481–497. Springer-Verlag London Ltd., London.
- França, J. E. M.; Vaz, M. I.; Coutinho, B. R.; Pina, L. (2023). *Analyzing organizational gaps in process accidents with FRAM: The case of the Imperial Sugar refinery explosion (2008)*. *Process Safety Progress*, 42(S1), S87–S96.
- GPIAAF – Gabinete de Prevenção e Investigação de Acidentes com Aeronaves e de Acidentes Ferroviários. (2025). *Relatório preliminar – acidente grave no Ascensor da Glória (Processo F_Inv20250903)*. GPIAAF, Lisboa.
- Hollnagel, E. (2012). *FRAM: The Functional Resonance Analysis Method – Modelling Complex Socio-Technical Systems*. Ashgate Publishing, Farnham.
- Hollnagel, E. (2014). *Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management*. Ashgate Publishing, Farnham.

- Kaya, G. K.; Stallard, R.; St-Laurent, M.; Li, W.-C.; Sujan, M. (2026). *Exploring Unstable Approaches in Aviation: Utilising Functional Resonance Analysis Method*. *The Aeronautical Journal*, 130, 917–943.
- Li, T.; Huang, W. (2025). *Risk-Accident Emergence and Prevention Method of High-Speed Railway System: Based on an Improved Functional Resonance Analysis Method*. *Reliability Engineering & System Safety*, 264, 111438.
- Patriarca, R.; Di Gravio, G.; Woltjer, R.; Costantino, F.; Praetorius, G.; Ferreira, P. (2020). *Framing the FRAM: A Literature Review on the Functional Resonance Analysis Method*. *Safety Science*, 129, 104827. Elsevier, Amsterdam.
- Peng, C., Zhen, X. e Huang, Y. (2023). Human-automation interaction centered approach based on FRAM for systemic safety analysis of dynamic positioning operations for offshore tandem offloading. *Ocean Engineering*, 280, 113249.
- Pires, H. F. (2012). *Imagens e história na Internet: os bondes, patrimônio brasileiro*. Comunicação apresentada no *Simpósio Internacional Globalización, Innovación y Construcción de Redes Técnicas Urbanas en América y Europa, 1890–1930: Brazilian Traction, Barcelona Traction y otros conglomerados financieros y técnicos*, Universidad de Barcelona, Barcelona, Espanha, 23–26 janeiro de 2012.
- Silva, V. F. (2020). *O bondinho de Santa Teresa: meio de transporte e patrimônio trilhando a memória e identidade do bairro*. Dissertação de Mestrado em História, Política e Bens Culturais, Fundação Getulio Vargas, Rio de Janeiro.
- Sujan, M.; Lounsbury, O.; Pickup, L.; Preston, K.; Patriarca, R. (2026). *Resilience Engineering concepts, Safety-II language, FRAM practice, and co-creating communities: how Hollnagel reshaped patient safety*. *Safety Science*, 200, 107210.
- Tierra-Arévalo, J. M.; Pardo-Ferreira, M. C.; Herrera-Pérez, V.; Rubio-Romero, J. C. (2024). *Review of the Functional Resonance Analysis Method and Other Tools for Resilience Analysis in the Construction Sector*. *Dirección y Organización*, 83, 70–80.
- Ümitli, S. H.; Ceylan, B. O.; Ercetin, A. (2026). *Functional Resonance Analysis (FRAM) of a Chemical Tanker Fire: A Systematic Approach to Enhancing Maritime Accident Analysis*. *Ocean Engineering*, 355, 125077.

Yasue, N.; Sato, G.; Sawaragi, T. (2026). *Extracting Knowledge of Workers by Identifying Performance Variability Using Functional Resonance Analysis Method. Reliability Engineering & System Safety*, 265, 111466.

APÊNDICES

APÊNDICE A - FUNDAMENTAÇÃO DOCUMENTAL DAS FUNÇÕES CONSIDERADAS NO MODELO FRAM DO ASCENSOR DA GLÓRIA

Tabela 5 - Fundamentação Documental das Funções Considerada no Modelo FRAM do Ascensor da Glória

	Função	Fundamentação principal	Relatório
F1	Adquirir cabo inadequado	Processo de aquisição de cabo com características divergentes das especificações previstas para o sistema	GPIAAF (2025)
F2	Aceitar inadequadamente cabo não conforme	Cabo recebido e aceite sem deteção das desconformidades identificadas posteriormente	GPIAAF (2025)
F3	Ignorar restrição técnica de utilização do cabo	Certificado do fabricante indicava incompatibilidade do cabo com destorcedores	GPIAAF (2025)
F4	Utilizar cabo incompatível com especificação	Cabo entrou em serviço apesar de não cumprir as especificações admitidas pela CCFL	GPIAAF (2025)
F5	Executar inadequadamente a fixação da pinha	Fragilidades identificadas na execução e controlo da pinha de fixação	GPIAAF (2025)
F6	Executar manutenção insuficiente do sistema	Limitações identificadas nos procedimentos, registos e controlo da manutenção	GPIAAF (2025)
F7	Inspecionar inadequadamente a zona crítica	Zona da rotura não observável pelos procedimentos de inspeção utilizados	GPIAAF (2025)

F8	Submeter o cabo a esforços contínuos	Cabo permaneceu em operação durante aproximadamente 337 dias	GPIAAF (2025)
F9	Agravar degradação estrutural do cabo	Evidências de roturas progressivas e degradação acumulada	GPIAAF (2025)
F10	Ativar insuficientemente o sistema de freio	Sistemas de travagem atuaram mas não impediram a progressão do acidente	GPIAAF (2025)
F11	Executar imobilização insuficiente das cabinas	Os mecanismos de emergência não conseguiram imobilizar adequadamente as cabinas	GPIAAF (2025)
F12	Produzir colisão das cabinas	Evento final descrito na sequência do acidente	GPIAAF (2025)
F13	Falhar na deteção de condições degradadas	Desconformidades, incompatibilidades e degradações não foram identificadas atempadamente	GPIAAF (2025)
F14	Aplicar enquadramento legal e supervisão técnica insuficientes	Lacunas regulatórias e ausência de supervisão técnica independente	GPIAAF (2025)

APÊNDICE B – FUNDAMENTAÇÃO DOCUMENTAL DAS FUNÇÕES CONSIDERADAS NO MODELO FRAM DO ELÉTRICO DE SANTA TERESA

Tabela 6 - Fundamentação Documental das Funções Consideradas no Modelo FRAM do Elétrico de Santa Teresa

Função	Descrição	Fundamentação documental	Fonte
F1	Permitir superlotação do bonde	O veículo envolvido no acidente transportava um número de passageiros superior à sua capacidade prevista. Testemunhos descrevem um aumento progressivo da lotação do bonde nos momentos que antecederam o acidente.	Silva (2020)
F2	Prosseguir operação do bonde em condições inseguras	A operação foi mantida apesar da existência de problemas recorrentes de manutenção, degradação dos veículos e limitações técnicas previamente conhecidas.	Silva (2020)
F3	Operar freios em condição degradada	Foram identificados problemas recorrentes nos sistemas de travagem, incluindo falhas, dificuldades de manutenção e deficiências verificadas no veículo envolvido no acidente.	Silva (2020)
F4	Perder controlo da velocidade do bonde	O bonde perdeu progressivamente a capacidade de reduzir e controlar a velocidade durante o percurso, situação associada às limitações do sistema de travagem.	Silva (2020)
F5	Colidir o bonde com infraestrutura urbana	Após a perda de controlo da velocidade, o veículo descarrilou e colidiu contra elementos da infraestrutura urbana, produzindo consequências para passageiros e para o sistema.	Silva (2020)
F6	Falhar supervisão segurança	Necessidades de manutenção e substituição de componentes eram identificadas, mas nem sempre recebiam resposta adequada ao nível da gestão. Foram igualmente reportadas limitações de recursos e investimentos insuficientes.	Silva (2020)

F7	Ignorar sinais de degradação do sistema	Existiam reclamações, acidentes anteriores, denúncias e alertas relativos ao estado dos veículos e dos seus componentes críticos sem que fossem implementadas ações preventivas eficazes.	Silva (2020)
F8	Funcionar o bonde em condições degradadas	Os veículos operavam num contexto caracterizado por problemas técnicos recorrentes, limitações de manutenção e condições consideradas precárias por diferentes intervenientes.	Silva (2020)
F9	Adaptar a operação para continuar o serviço	A continuidade do serviço apesar das limitações técnicas e da reduzida disponibilidade operacional sugere a realização de ajustamentos operacionais destinados a manter o funcionamento do sistema.	Silva (2020)
F10	Manter circulação do bonde apesar das vulnerabilidades	O sistema continuou a desempenhar a sua função de transporte apesar da existência de problemas conhecidos, limitações estruturais e dificuldades de manutenção.	Silva (2020)
F11	Aumentar procura pelo serviço do bonde	O bonde desempenhava um papel relevante na mobilidade local, verificando-se uma procura significativa pelo serviço mesmo perante as limitações operacionais existentes.	Silva (2020)
F12	Acumular degradação histórica do sistema	As fontes descrevem sucateamento da frota, deterioração das condições de manutenção, problemas recorrentes nos freios e um processo progressivo de precarização do sistema.	Silva (2020)

F13	Aceitar continuidade de condições de risco	Os problemas associados à manutenção, ao estado de conservação dos veículos e às limitações estruturais eram amplamente conhecidos antes do acidente, mas permaneceram ativos durante a operação do sistema.	Silva (2020)
F14	Permitir continuidade de condições inseguras	As vulnerabilidades associadas ao estado de conservação dos veículos, aos problemas de manutenção, às limitações operacionais e às deficiências dos sistemas de segurança permaneceram presentes durante a exploração do sistema. Apesar dos sinais de degradação identificados, a operação foi mantida, permitindo a persistência de condições inseguras ao longo do tempo.	Silva (2020)

APÊNDICE C – DECLARAÇÃO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Declaração sobre a utilização de Inteligência Artificial

Durante a elaboração desta dissertação foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial generativa como apoio à revisão linguística, reformulação de texto e melhoria da clareza da escrita. Todas as decisões relativas ao conteúdo científico, análise, interpretação dos resultados e conclusões foram da responsabilidade da autora.