

Abordagem Computacional para Investigação de Acidentes e Falhas em Sistemas Sociotécnicos Complexos com Inteligência Artificial (IA)

Wilson da Silva Alves^{a*}, Assed Naked Haddad^b, Bruno Barzellay Ferreira da Costa^c

^aUniversidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro-RJ, Brasil

^bUniversidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro-RJ, Brasil

^cUniversidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Ambiental, Macaé-RJ, Brasil

*wilson.silva@poli.ufrj.br

RESUMO

Sistemas industriais modernos apresentam elevada complexidade devido à interação entre fatores técnicos, humanos e organizacionais. Nesse contexto, métodos tradicionais de análise de acidentes baseados em causalidade linear apresentam limitações para compreender falhas em sistemas sociotécnicos complexos. Este estudo propõe o desenvolvimento de uma ferramenta computacional de apoio à investigação de acidentes baseada na integração entre HFACS, AcciMap e Inteligência Artificial. A ferramenta foi desenvolvida em Python utilizando processamento de linguagem natural para analisar relatos de acidentes e sugerir classificações de fatores contribuintes. Os resultados indicam que a abordagem contribui para organizar informações investigativas, acelerar a análise inicial de dados e ampliar a identificação de fatores sistêmicos frequentemente negligenciados.

Palavras-chave: Investigação de acidentes; Sistemas sociotécnicos; HFACS; Inteligência Artificial.

1. Introdução

Os sistemas industriais atuais apresentam elevados níveis de complexidade decorrentes das interações entre fatores técnicos, humanos e organizacionais. Esses sistemas são classificados como sistemas sociotécnicos complexos, caracterizados por múltiplos subsistemas e relações parcialmente conhecidas ou emergentes durante a operação (Hollnagel; Erik, 2014; Hollnagel; Hounsgaard; Colligan, 2014; Salehi; Veitch; Smith, 2021). Nesse contexto, o desempenho e a segurança resultam da interação entre tecnologia, processos operacionais, decisões humanas e estruturas organizacionais (Ahmadi Rad; Lefsrud; Hendry, 2023; Foster; Plant; Stanton, 2023; Shaban et al., 2022).

Um dos grandes problemas é que historicamente, muitas metodologias de análise de riscos foram desenvolvidas para sistemas predominantemente técnicos. Métodos como FMEA, HAZOP, ETA, FTA e Análise Preliminar de Riscos (APR) baseiam-se em modelos de causalidade linear, nos quais acidentes são interpretados como cadeias de falhas ou eventos específicos (Leveson, 2004). Entretanto, esses métodos apresentam limitações quando aplicados a sistemas sociotécnicos complexos, nos quais a segurança depende de múltiplos níveis de controle e interações organizacionais dinâmicas (Dallat; Salmon; Goode, 2019; Patriarca et al., 2022).

Como resposta, metodologias sistêmicas de investigação de acidentes foram desenvolvidas, incluindo STAMP, AcciMap, FRAM e HFACS, capazes de analisar acidentes considerando múltiplos níveis do sistema e fatores organizacionais (Hollnagel, 2012a, 2012b; Leveson, 2004; Patriarca et al., 2022; Shaban et al., 2022). Entre essas abordagens, o HFACS destaca-se por oferecer uma taxonomia estruturada para classificar fatores humanos e organizacionais envolvidos em acidentes (Reason, 1990, 2000). Estudos recentes indicam que o HFACS apresenta maior potencial quando integrado a outras abordagens sistêmicas e a ferramentas computacionais, ampliando a análise de dados (Alves; Haddad; Ferreira Da Costa, 2026). Paralelamente, avanços em Inteligência Artificial têm ampliado o apoio à investigação de acidentes, permitindo analisar grandes volumes de dados e identificar padrões complexos de causalidade (Ziakkas; Pechlivanis, 2023).

Apesar desses avanços, muitos processos investigativos ainda dependem de análises manuais e da experiência dos investigadores (Patriarca et al., 2022). Nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à investigação de acidentes baseada na integração entre HFACS, AcciMap e Inteligência

Artificial, utilizando processamento de linguagem natural para identificar e classificar fatores contribuintes em acidentes.

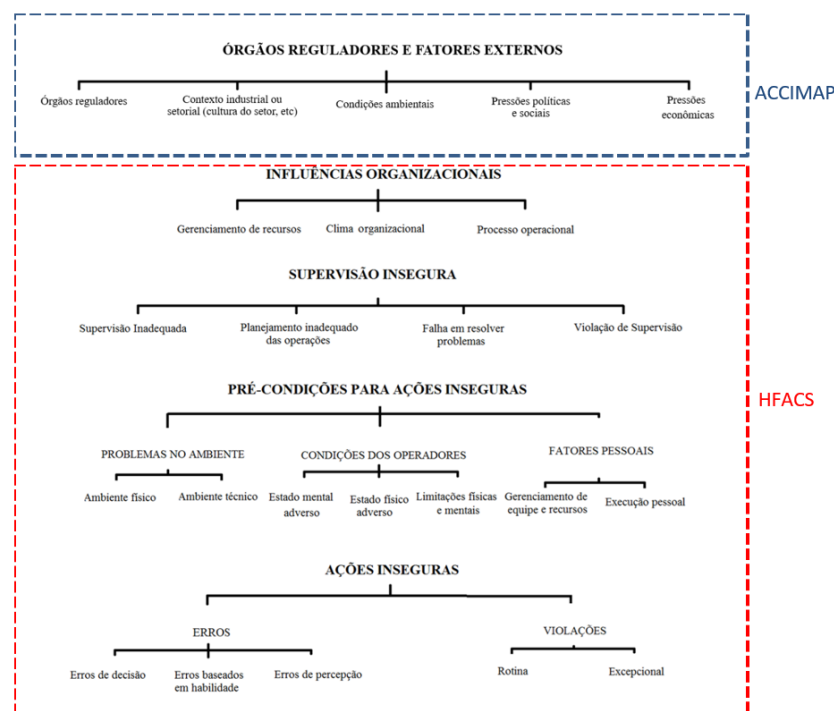
2. Metodologia

Este estudo tem como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para apoio à investigação de acidentes em sistemas sociotécnicos, integrando Inteligência Artificial (IA) a uma estrutura de classificação baseada no HFACS e no AcciMap. A ferramenta foi desenvolvida em Python, utilizando Streamlit, PyPDF, Pathlib, Datetime e a API da OpenAI, para auxiliar na identificação e classificação de fatores humanos, organizacionais e sistêmicos em relatos de acidentes. O procedimento metodológico foi estruturado em três etapas: (i) definição do arcabouço conceitual; (ii) funcionamento do sistema; e (iii) processamento de dados.

2.1 Arcabouço conceitual

O arcabouço conceitual da ferramenta baseia-se no Human Factors Analysis and Classification System (HFACS), desenvolvido por Shappell & Wiegmann (2000) a partir do modelo de acidentes organizacionais de Reason (1990). O HFACS organiza fatores contribuintes em quatro níveis: atos inseguros, pré-condições para atos inseguros, supervisão inadequada e influências organizacionais, permitindo classificar fatores humanos e organizacionais de forma estruturada. Contudo, estudos sobre sistemas sociotécnicos complexos indicam que acidentes também envolvem fatores externos ao ambiente organizacional, como pressões econômicas, decisões regulatórias e políticas públicas (Rasmussen, 1997). Assim, a ferramenta incorpora um quinto nível analítico, denominado “órgãos reguladores e fatores externos”, inspirado na abordagem AcciMap, ampliando a estrutura HFACS para capturar influências institucionais e regulatórias no sistema de segurança.

Figura 1. Estrutura da ferramenta baseada no HFACS com quinto nível analítico



2.2 Arquitetura do Sistema

O software utiliza bibliotecas Streamlit, PyPDF, Pathlib e Datetime, além da API da OpenAI para processamento de linguagem natural. O Streamlit foi empregado para a construção da interface web interativa da ferramenta, permitindo a inserção de dados e visualização dos resultados da análise. A biblioteca PyPDF foi utilizada para leitura e extração de texto de documentos em formato PDF, enquanto Pathlib foi empregada para gerenciamento de arquivos e diretórios da aplicação. A biblioteca Datetime foi utilizada para manipulação de datas e horários associados aos registros do acidente.

A arquitetura do sistema foi projetada de forma modular, sendo composta por quatro componentes principais, conforme ilustrado na figura 2: (i) módulo de coleta de dados (entrada e gerenciamento de dados); (ii) conexão com conhecimento; e (iii) módulo de análise por Inteligência artificial (classificação e apoio à análise).

Na primeira etapa, coleta de dados, o sistema realiza a coleta estruturada das informações do acidente por meio do programa computacional. O investigador registra dados essenciais do evento, no próprio software ou inserindo um arquivo (pdf, doc, xls, etc), com informações do acidente, incluindo identificação da vítima, função exercida, data, hora e local do acidente, setor envolvido, entre outros. Também são inseridas descrições narrativas do evento e da atividade executada no momento da ocorrência. Para apoiar o processo investigativo, o aplicativo apresenta perguntas guiadas baseadas na estrutura analítica do Human Factors Analysis and Classification System (HFACS). Essas perguntas auxiliam na identificação preliminar de fatores contribuintes distribuídos em cinco níveis: atos inseguros, condições precursoras, supervisão inadequada, influências organizacionais e fatores externos. Essa etapa organiza sistematicamente as informações iniciais do acidente, promovendo maior consistência na coleta de dados e fornecendo uma base estruturada para as etapas subsequentes de análise.

Figura 2. Funcionamento do sistema computacional de investigação de falhas e acidentes



Após a inserção dos dados do acidente, o sistema estabelece conexão com uma base de conhecimento composta por documentos técnicos e científicos previamente armazenados. Esses materiais incluem artigos, manuais e referências metodológicas associadas a abordagens sistêmicas de investigação de acidentes, como HFACS e AcciMap. O aplicativo realiza a extração automática de trechos relevantes desses documentos, formando um corpus de referência utilizado durante o processo de análise. Esse mecanismo funciona de maneira semelhante ao princípio de Retrieval-Augmented Generation (RAG), no qual conteúdos externos são incorporados ao contexto fornecido ao modelo de inteligência artificial.

Em resumo, quando o aplicativo lê artigos, manuais e documentos técnicos sobre investigação de acidentes, ele passa a ter acesso a conhecimentos que explicam como esse tipo de análise deve ser feito. Esses documentos funcionam como uma referência que orienta a inteligência artificial durante a interpretação das informações do acidente. Essa etapa é importante, pois reduz o risco de análises superficiais, simplificadas ou genéricas. A inteligência artificial consegue comparar as informações do acidente com conceitos já discutidos na literatura científica, como os fatores humanos, organizacionais e sistêmicos envolvidos nos acidentes. Além disso, quando

o sistema recebe o relatório ou informações do acidente, ele consegue considerar mais detalhes do ocorrido. Outra vantagem é a possibilidade de atualizar o conhecimento do sistema pela simples inclusão de novos documentos na pasta de suporte, sem necessidade de modificar a arquitetura do software. Assim, o mecanismo de recuperação de conhecimento funciona como uma camada intermediária entre a literatura técnica da área de segurança e o processo automatizado de análise de acidentes.

Na terceira etapa, a partir dessas informações obtidas nas etapas anteriores, a IA interpreta o evento de forma sistêmica, classificando os fatores contribuintes segundo a estrutura do HFACS. A interação entre o software e o modelo de Inteligência Artificial é realizada por meio de uma Application Programming Interface (API) disponibilizada pelo provedor do modelo de linguagem. Essa interface permite que aplicações externas enviem solicitações estruturadas contendo instruções e dados contextuais para o modelo, que processa essas informações e retorna uma resposta textual gerada pelo sistema de IA. A ferramenta organiza automaticamente as informações fornecidas pelo analista, incluindo descrições narrativas do evento e respostas guiadas baseadas no HFACS, e envia esses dados ao modelo de linguagem. O modelo processa o contexto e retorna uma resposta estruturada contendo a análise do acidente, síntese dos fatores contribuintes e recomendações sistêmicas.

Na etapa final, o sistema apresenta ao investigador um relatório preliminar, um resumo técnico dos fatores identificados segundo o HFACS e recomendações de prevenção. O analista pode revisar, editar e validar o conteúdo gerado pela inteligência artificial antes da exportação dos documentos finais. Dessa forma, a ferramenta atua como apoio à investigação, mantendo o investigador humano responsável pela interpretação e validação final dos resultados.

3. Resultados

A Figura 3 apresenta a interface inicial da ferramenta desenvolvida. Os resultados indicam que a ferramenta contribui para a organização estruturada das informações do acidente, reduzindo inconsistências na classificação dos fatores contribuintes e apoiando análises mais sistemáticas. A aplicação do modelo evidenciou que acidentes em sistemas sociotécnicos envolvem fatores distribuídos em múltiplos níveis do sistema. A inclusão do nível “Órgãos reguladores e fatores externos”, derivado do AcciMap, ampliou a capacidade analítica ao permitir a identificação de fatores macroestruturais, como regulamentações, políticas institucionais e pressões econômicas que influenciam as condições de segurança.

Figura 3. Interface inicial da ferramenta de investigação de falhas e acidentes



Observou-se também que o uso de Inteligência Artificial acelera a etapa inicial de análise de relatos de acidentes, especialmente em cenários com grande volume de dados textuais. Nesse contexto, o sistema atua como ferramenta de apoio à triagem e organização das informações, permitindo que os investigadores concentrem esforços na interpretação dos resultados e na elaboração de recomendações. De modo geral, a ferramenta apresenta potencial para apoiar investigações mais estruturadas e consistentes, favorecendo a identificação de fatores sistêmicos frequentemente negligenciados em abordagens tradicionais centradas em causas imediatas. Apesar dos resultados

promissores, recomenda-se a aplicação da ferramenta em casos reais de investigação de acidentes para avaliar sua efetividade em diferentes contextos sociotécnicos. Também se sugere explorar sua integração com outras abordagens sistêmicas, como STAMP, FRAM ou redes bayesianas. Além disso, estudos futuros podem investigar o uso de bases de conhecimento ampliadas e modelos de linguagem mais especializados, bem como mecanismos de aprendizado a partir de novos casos analisados. A Figura 4 apresenta a estrutura de perguntas guiadas incorporada à ferramenta.

Figura 4. Estrutura de perguntas guiadas utilizada pela ferramenta para apoio à investigação de acidentes.

Apoio à classificação do acidente – HFACS

Primeiro, registre sua síntese em cada nível. Em seguida, utilize as perguntas guiadas logo abaixo de cada nível.

Nível 1 – Atos inseguros (erros e violações identificadas)

Comentários do analista – Nível 1

Registre aqui os principais atos inseguros, erros e violações identificadas (visão do analista).

> Perguntas guiadas – Nível 1 (Atos inseguros)

Nível 2 – Condições precursoras

Comentários do analista – Nível 2

Registar condições de trabalho, fatores do operador, ambiente, planejamento, etc.

> Perguntas guiadas – Nível 2 (Condições precursoras)

Nível 3 – Supervisão inadequada

Comentários do analista – Nível 3

Registar falhas de supervisão, planejamento de operações, correção de desvios, etc.

> Perguntas guiadas – Nível 3 (Supervisão inadequada)

Nível 4 – Influências organizacionais

Comentários do analista – Nível 4

Registar fatores de cultura de segurança, gestão de recursos e processos organizacionais.

> Perguntas guiadas – Nível 4 (Influências organizacionais)

Nível 5 – Fatores externos

Comentários do analista – Nível 5

Registar fatores externos: normas, fiscalização, contratos, políticas públicas, mercado, tecnologia, etc.

> Perguntas guiadas – Nível 5 (Fatores externos)

4. Conclusões

Este trabalho apresentou uma ferramenta computacional para apoio à investigação de acidentes em sistemas sociotécnicos complexos, integrando HFACS, elementos do AcciMap e Inteligência Artificial baseada em processamento de linguagem natural. Os resultados indicam que a abordagem contribui para organizar informações investigativas, acelerar a análise inicial de relatos de acidentes e ampliar a identificação de fatores sistêmicos, incluindo aspectos organizacionais e regulatórios frequentemente negligenciados.

Entretanto, a ferramenta deve ser entendida como apoio à investigação, não substituindo o julgamento do especialista. A aplicação em casos reais é necessária para validar e aprimorar o modelo proposto.

5. Referências

AHMADI RAD, Mona; LEFSRUD, Lianne M.; HENDRY, Michael T. **Application of systems thinking accident analysis methods: A review for railways.** *Safety Science* Elsevier B.V., , 1 abr. 2023.

ALVES, W. S.; HADDAD, Assed Naked; FERREIRA DA COSTA, Bruno Barzellay. Beyond Human Error: A Systematic Review of Accident Investigation in Sociotechnical Systems. *Revista de Gestão e Secretariado*, v. 17, n. 3, p. 1–31, 12 mar. 2026.

DALLAT, Clare; SALMON, Paul M.; GOODE, Natassia. Risky systems versus risky people: To what extent do risk assessment methods consider the systems approach to accident causation? A review of the literature. **Safety Science**, v. 119, p. 266–279, 1 nov. 2019.

FOSTER, Craig J.; PLANT, Katherine L.; STANTON, Neville A. Maladaptation in air traffic management: Development of a Human Factors methods framework. **Human Factors and Ergonomics In Manufacturing**, v. 33, n. 1, p. 118–146, 1 jan. 2023.

HOLLNAGEL, Erik. **FRAM: The FuncTionAl ResonAnce AnALysis MeThod**. 1st edition ed. Boca Raton, FL: CRC Press (Taylor & Francis Group), 2012a.

HOLLNAGEL, Erik. Coping with complexity: Past, present and future. **Cognition, Technology and Work**, v. 14, n. 3, p. 199–205, set. 2012b.

HOLLNAGEL; ERIK. **Safety-I and Safety-II The Past and Future of Safety Management**. First edition ed. Burlington, VT, USA: Ashgate Publishing Limited, 2014.

HOLLNAGEL, Erik; HOUNSGAARD, Jeanette; COLLIGAN, Lacey. **FRAM-the Functional Resonance Analysis Method-a handbook for the practical use of the method**. Tradução: Lacey Colligan. First edition ed. Middelfart, Denmark: Centre for Quality, Region of Southern Denmark, 2014.

LEVESON, Nancy. A new accident model for engineering safer systems. **Safety Science**, v. 42, n. 4, p. 237–270, 2004.

LINTERN, Gavan. **Jens Rasmussen’s risk management framework. Theoretical Issues in Ergonomics Science**Taylor and Francis Ltd., , 2 jan. 2020.

PATRIARCA, Riccardo *et al*. The past and present of System-Theoretic Accident Model And Processes (STAMP) and its associated techniques: A scoping review. **Safety Science**, v. 146, 1 fev. 2022.

RASMUSSEN, Jens. **RISK MANAGEMENT IN A DYNAMIC SOCIETY: A MODELLING PROBLEMS****Safety Science**. [S.l.: S.n.].

REASON, James. **Human Error**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1990.

REASON, James. **Education and debate Human error: models and management****BMJ**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <www.bmj.com>.

SALEHI, Vahid; VEITCH, Brian; SMITH, Douglas. **Modeling complex socio-technical systems using the FRAM: A literature review. Human Factors and Ergonomics In Manufacturing**John Wiley and Sons Inc, , 1 jan. 2021.

SHABAN, Ahmed *et al*. A systems-theoretic hazard analysis for safety-critical medical gas pipeline and oxygen supply systems. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 77, 1 jul. 2022.

SHAPPELL, Scott A.; WIEGMANN, Douglas A. **The Human Factors Analysis and Classification System-HFACS**. [S.l.: S.n.].

ZIAKKAS, Dimitrios; PECHLIVANIS, Konstantinos. Artificial intelligence applications in aviation accident classification: A preliminary exploratory study. **Decision Analytics Journal**, v. 9, 1 dez. 2023.