

ABORDAGENS TRADICIONAIS DE ANÁLISE DE ACIDENTE DE TRABALHO: CARACTERÍSTICAS, CRÍTICAS E SUGESTÃO DE NOVA ABORDAGEM FUNDAMENTADA EM TEORIA GERAL DE SISTEMAS

Renan Guimarães Landi¹

Uiara Bandinelli Montedo²

Sumário: 1 Introdução. 2 Metodologia. 3 Desenvolvimento – Abordagens Tradicionais em Análise de Acidentes. 3.1 Teoria do Dominó de Heinrich. 3.1.1 Críticas à Teoria do Dominó de Heinrich. 3.2 Modelo do Queijo Suíço de Reason – SCM; 3.2.1 Críticas ao SCM. 3.3 Árvore de Causas ou Análise de Causa Raiz (RCA). 3.3.1 Críticas à RCA. 3.4 Modelo da Gravata Borboleta. 3.4.1 Críticas ao Modelo da Gravata Borboleta. 3.5 Sistema de Análise de Classificação de Fatores Humanos – HFACS. 3.5.1. Críticas ao HFACS. 3.6 Método de Análise de Ressonância Funcional – FRAM. 3.6.1 Críticas ao FRAM. 3.7 Modelo do Mapa de Acidente – Accimap. 3.7.1 Críticas ao AcciMap. 4. Análise dos Resultados. 4.1 STAMP. 4.2 Análise Causal Baseada em STAMP – CAST. 4.3 Exemplo de aplicação de CAST. 4.3.1 Análise do órgão governamental. 4.3.2. Análise STAMP/CAST. 5. Conclusão. Referências Bibliográficas.

RESUMO

Atualmente, abordagens tradicionais de análise de acidente - como Queijo Suíço, Gravata Borboleta e Análise da Causa Raiz - são amplamente utilizadas por acadêmicos e profissionais da segurança e saúde no trabalho no estudo desses eventos. Todavia, em sua maioria, essas abordagens tradicionais baseiam-se em teorias da década de 1990 que, apesar de úteis, não são capazes de lidar

¹ Auditor-Fiscal do Trabalho do Ministério do Trabalho e Emprego desde 2014, atuando em investigações de acidente de trabalho e em fiscalizações de normas trabalhistas. Graduado em Engenharia de Computação pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), especialista em Direito do Trabalho pela Uniamérica e Mestrando do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) renan.landi@usp.br.

² Professora Doutora do Departamento de Engenharia de Produção da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), na qual desenvolve atividades de ensino, pesquisa e extensão, com foco nos seguintes temas: Ergonomia, Engenharia de Segurança do Trabalho, Cadeias Produtivas da Agricultura Familiar, Sistemas Agroalimentares, Agricultura Urbana, Combate à Fome e Saúde Planetária. Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Escola Politécnica da USP (2022), graduada em Engenharia Agrônômica (1986), Mestre em Engenharia de Produção (1994) e Doutora em Engenharia de Produção (2001), titulações estas obtidas na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).



adequadamente com toda a complexidade do mundo moderno, que inclui interação entre homem, máquina, algoritmo e ambiente. Igualmente, essas abordagens: limitam o potencial de aprendizado de um evento adverso; são influenciadas, em um nível indesejado, pela subjetividade do investigador do acidente; e sofrem do viés retrospectivo, inevitavelmente representando o “erro humano” ou “ato inseguro” como um dos fatores contribuintes do acidente. Esse trabalho objetivou revisar a literatura a fim de identificar o estado da arte em análise de acidentes de trabalho. Como resultado, a abordagem STAMP/CAST, baseada em Teoria Geral de Sistemas – TGS, é apresentada como forma a superar as limitações das ferramentas tradicionais. Diversos estudos apontaram que STAMP/CAST foi superior às técnicas tradicionais na identificação de fatores causais e na geração de recomendações para prevenção de novos acidentes.

Palavras-chave: análise de acidentes; acidentes de trabalho; STAMP; CAST; erro humano.

1 INTRODUÇÃO

Recentemente, carros e aviões autônomos protagonizaram graves acidentes (SAVIĆ, 2022), frutos do crescimento exponencial de interações entre homem, algoritmo, máquina e ambiente. Ao longo da história, as invenções e novas tecnologias muitas vezes se adiantaram a seus fundamentos científicos e ao conhecimento de engenharia, resultando em aumento de riscos e acidentes até que a ciência e engenharia finalmente os alcançassem (LEVESON, 2012). Porém, mesmo em tecnologias com razoável entendimento da engenharia, como caldeiras, os acidentes continuam ocorrendo, com enormes danos pessoais e patrimoniais (LANDI; MONTEDO; LAHOZ, 2022).

Atualmente, a vasta maioria das abordagens de análise de acidentes representa, indevidamente, os infortúnios como eventos encadeados, simplificando, em demasiado, processos complexos e limitando o aprendizado dos envolvidos e a adoção de medidas de proteção adequadas (LEVESON, 2012). Investigações de acidentes ampliados – como os de Bhopal, em 1984, e de Chernobyl, em 1986 – demonstram que não houve uma coincidência de



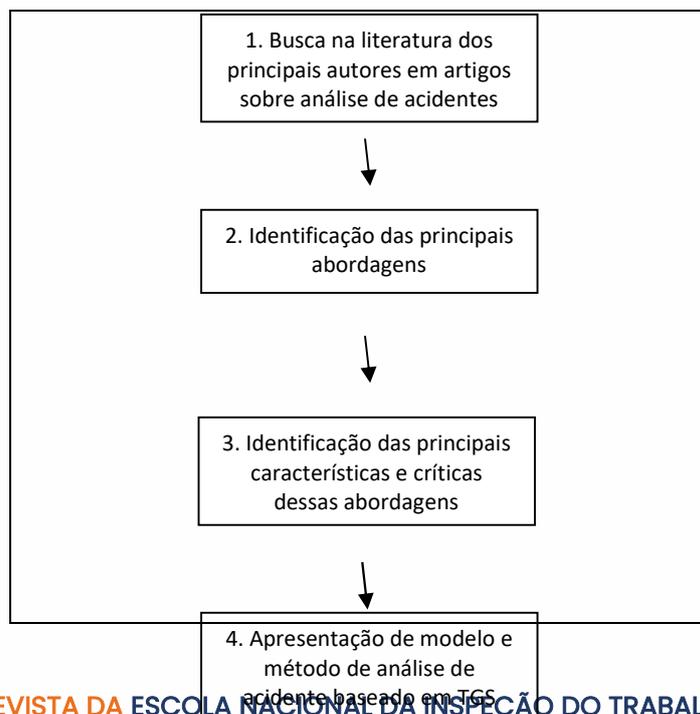
falhas independentes e “erros humanos”, mas uma perda sistemática e gradual dos controles de segurança do sistema, migrando lentamente o sistema para uma condição de maior risco sob a influência de pressões de custo-benefício em um ambiente agressivo e competitivo (RASMUSSEN, 1997).

Nesse sentido, o presente estudo objetiva apropriar-se do estado da arte em abordagens de análise de acidentes e identificar um novo tipo de abordagem capaz de lidar com essa complexidade e conjunto de objetivos conflitantes.

2 METODOLOGIA

Primeiramente, buscou-se identificar artigos recentes de revisão na literatura que versam sobre abordagens de análise de acidentes. Em uma segunda etapa, extraíram-se desses artigos as principais abordagens, tanto aquelas com relevância histórica, pela contribuição que tiveram em suas épocas, quanto as adotadas atualmente por práticos e acadêmicos. Na sequência, as principais características e limitações dessas abordagens foram identificadas. Por fim, uma nova abordagem, capaz de lidar superar essas limitações é apresentada e discutida. A Figura 1 resume os passos retro citados.

Figura 1 – Passos adotados no presente estudo



3. DESENVOLVIMENTO – ABORDAGENS TRADICIONAIS EM ANÁLISE DE ACIDENTES

Uma recente revisão da literatura identificou ao menos 29 modelos ou abordagens de análise de acidente desenvolvidos nos últimos 100 anos (FU *et al.*, 2020). Nesta seção, apresentam-se alguns dos principais destes adotados no meio acadêmico e prático, sem a pretensão de esgotá-los.

3.1 TEORIA DO DOMINÓ DE HEINRICH

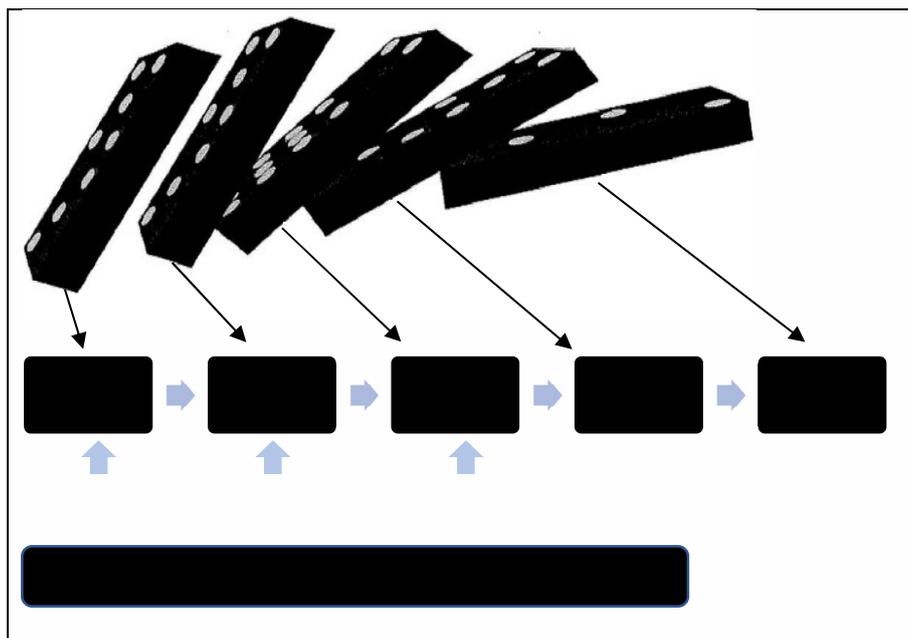
Na década de 1930, Herbert Heinrich foi um dos pioneiros no campo da prevenção de acidentes (MANUELE, 2013). Segundo a Teoria do Dominó, também denominada de Teoria de Heinrich, o acidente seria causado pela ocorrência de cinco “pedras de dominós” encadeadas no tempo (Figura 2) (STRINGFELLOW, 2010), a saber:

- a) ancestralidade e ambiente social: falhas de personalidade herdadas ou influenciadas pelo ambiente, como ganância e negligência;
- b) personalidade descuidada: também relativo às falhas de personalidade, porém aquelas relativas ao da própria pessoa;
- c) ato ou condição insegura: como, por exemplo, ligar uma máquina sem aviso prévio ou sem verificar se há pessoas em sua zona de perigo;
- d) o acidente propriamente dito; e
- e) lesão resultante.

Dessa forma, para a prevenção de acidentes, bastaria a eliminação de uma das “pedras do dominó” para interromper a cadeia de transmissão de eventos causadores de lesões (IIDA, 1991). Heinrich igualmente defendia que a redução da frequência de acidentes alcançaria uma atenuação equivalente na gravidade das lesões, o que alguns autores denominam Pirâmide de Heinrich (MANUELE, 2013).



Figura 2 – Cinco pedras do dominó apontadas na teoria de Heinrich



Fonte: adaptado de Stringfellow (2010)

3.1.1 Críticas à Teoria do Dominó de Heinrich

Ambos os achados da Teoria –que os atos inseguros são a principal causa de acidentes e a Pirâmide de Heinrich – foram refutados cientificamente (MANUELE, 2013). (IIDA, 1991) também tece as seguintes críticas:

Essa teoria tem sido contestada porque admite, como premissa, a existência de uma personalidade com predisposição para acidentes [...]. Outro problema é que a maioria dos acidentes não poderia ser explicada pela simples sucessão linear e temporal de uma cadeia de eventos. Esses eventos teriam um tipo de interação mais complexa, não se sucedendo, uns atrás dos outros, mas interagindo entre si. Isto significa dizer que a eliminação de um deles para se interromper a cadeia, na prática, pode não ser tão trivial como prega essa teoria.

Em que pesem as críticas a Heinrich, suas premissas ainda hoje são base para muitas empresas e profissionais em SST. Por exemplo, em relatórios elaborados por empresas em acidentes investigados pelo Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), ocorridos entre os anos de 2017 e 2022, características ou resquícios do Modelo do Dominó se fazem presentes tanto nas conclusões do acidente quanto nos campos dos formulários (vide na, Figura 3, termos como



“indisciplina”, “desrespeito” e “negligência”).

Figura 3 – Trechos de relatório exemplo de acidente, elaborado pelo empregador, que envolveu amputação traumática de quatro dedos do trabalhador em 2021, com características do Modelo do Dominó presentes tanto no formulário quanto no relato do acidente

18. Qual a atividade no momento do acidente?			
Se preparava para executar limpeza de retirada de bucha partes das guarnições			
19. O QUE ACONTECEU e COMO ACONTECEU ? (fontes: Acidentado, Supervisão e Seg. do Trabalho).			
<p>██████████ A funcionário executava trabalho na desfiadeira, desfiando material NT, quando o tambor travou, pois era aparas mais largas, desligou na botoeira de emergência, levantou a proteção, saiu para pegar o gancho, ferramenta utilizada para a retirada de buchas, entre as guarnições, na volta tropeçou no material que estava ao lado da máquina, desequilibrou e caiu, batendo sua mão direita entre as guarnições que girava na inercia, vindo atingir 1,2,3 e 4 dedos.</p>			
35. Fatores pessoais que contribuirão para o acidente:			
36. FATORES DO ACIDENTE			
Imprudência	Negligência	Imperícia	Condição insegura
	X		
37. Parecer técnico:			
SESMT	Ato de indisciplina por desrespeita procedimento de segurança da empresa, (Ordem de Serviço 01)		
	Causas: Negligência		

Fonte: Brasil (2022)

3.2 MODELO DO QUEIJO SUÍÇO DE REASON – SCM

É o modelo mais popular de análise de acidente (SALMON; CORNELISSEN; TROTTER, 2012), utilizado por diversas indústrias de alto risco (LAROUZEE; LE COZE, 2020), sendo reconhecido por introduzir o conceito de multicausalidade dos acidentes (KATSAKIORI; SAKELLAROPOULOS; MANATAKIS, 2009).

Com a ocorrência de diversos acidentes ampliados na década 1980 –



como Challenger, em 1986, e Piper Alpha, em 1988 – os relatórios resultantes das investigações começam a ressaltar a dimensão organizacional desses eventos e como os “erros humanos” dos operadores, *per se*, não explicam satisfatoriamente os fatores contribuintes (HOLLNAGEL, 2016; LAROUZEE; LE COZE, 2020; REASON, 1990a).

Reason afirma que os sistemas sociotécnicos são constituídos por diversas barreiras que protegem potenciais vítimas ou patrimônios de perigos locais e que, inevitavelmente, essas defesas não são invulneráveis ou intransponíveis, possuindo as “lacunas” em suas estruturas (REASON, 2000). Na maior parte dos casos, essas lacunas persistem no sistema de forma silenciosa e inofensiva, até que um acidente lance luz sobre elas (REASON, 2000). Quanto maior a presença de lacunas – causados por “falhas ativas” e “condições latentes” –, maior a probabilidade de estas se alinharem, permitindo a trajetória direta de um perigo em direção a um bem protegido, causando uma perda (Figura 4) (REASON, 2016). As falhas ativas seriam as causas imediatas e mais facilmente observáveis em acidentes – por exemplo, ausência de um dispositivo de segurança em uma máquina. Ao revés, as condições latentes, como informado supra, podem permanecer, por anos, ocultas à organização – por exemplo, um design de máquina inadequado ou supervisão e treinamento insuficientes (REASON, 2016). As condições latentes seriam engendradas por aqueles cujas atividades estão afastadas, tanto em tempo quanto espaço, da interface homem-máquinas, como projetistas de máquinas, alta direção, órgãos de regulação, gerência e equipe de manutenção. Quanto maior a posição hierárquica desses indivíduos, maior seu potencial de criar condições latentes dentro da estrutura da organização (REASON, 1990a).

Segundo Reason, a forma mais efetiva de atuação de um profissional de SST reside na revisão das defesas inadequadas, com a adoção da chamada “defesa-em-profundidade” (*defense-in-depth*) entre o perigo e os bens protegidos (REASON, 2016), uma abordagem emprestada da segurança nuclear (AHN; GUARNIERI; FURUTA, 2017).



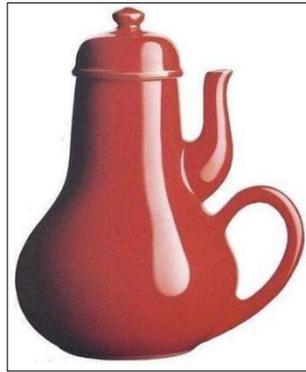
barreiras em redundância, é que a perda de função em uma dessas barreiras pode não causar um efeito imediato e visível da redução da segurança aos operadores humanos ou artificiais (RASMUSSEN, 1997).

Por fim, modernamente, há críticas ao uso indiscriminado da expressão “falha”, em relatórios de investigação de acidente de trabalho, fora do contexto de componentes físicos, uma vez que a expressão já carrega um julgamento. Por exemplo, concluir que “o trabalhador ‘falhou’ em antecipar o risco” é apenas mais uma forma de julgar e atribuir a culpa ao operador, corolário do viés retrospectivo (HOLLNAGEL, 2012; LEVESON, 2012)”. Atribuir “falha”, “negligência” ou “erro” ao operador, à empresa ou ao software não é tão eficaz porquanto desincentiva a busca por outras explicações ou implicações do evento adverso. Assim, uma expressão reformulada, desimbuída de culpa ou julgamento, como “o trabalhador não detectou o risco”, exigiria do investigador outros esclarecimentos, tais como: (a) por que o risco não foi detectado pelo trabalhador? (b) As informações retornadas pelo sistema (*feedbacks*) permitiriam um comportamento diferente? (c) Todas as interações indesejáveis entre meio-homem-máquina foram previstas e tratadas pelos projetistas? (d) O design é adequado?

Sem mudar o meio em que se insere, não se pode esperar mudanças relevantes no resultado do comportamento dos operadores (LEVESON, 2011). Cita-se, a título de exemplo, o design desconfortável do bule de chá idealizado por Donald Norman, em seu livro *O Design do Dia a Dia*, inclinado a causar “acidentes” ou “derramamentos”, por parte de seus manipuladores (Figura 5). Seria demasiado reducionista e equivocado, senão inútil, eventual conclusão no sentido de indicar “falha” dos degustadores em não derramar o chá.



Figura 5 – O bule de chá desconfortável.



Fonte: Norman (2018)

Cumpra salientar que não se está a afirmar que inexistente culpa³ (ou dolo) em acidentes de trabalho. Apenas alega-se que a atribuição de culpa não é o objetivo de uma análise de acidente focada em prevenir futuros infortúnios. Como explicado alhures, além de simplificá-la em excesso, a atribuição de culpa limita a abrangência e o aprendizado das investigações. A culpa sequer é um conceito de engenharia (LEVESON, 2012), devendo ser objeto de análise por parte de órgãos competentes, como Justiça e polícias judiciárias.

3.3 ÁRVORE DE CAUSAS OU ANÁLISE DE CAUSA RAIZ (RCA)

A RCA parte da premissa de que os sistemas e eventos são inter-relacionados. Deste modo, uma ação em parte do sistema desencadeia uma reação em outra, que por sua vez desencadeia em outra, e assim por diante (HOLLNAGEL, 2012). Ao mapear essas ações e reações, descobre-se onde o problema começou e como ele se transformou no sintoma que a organização está enfrentando agora. (HOLLNAGEL, 2012).

Existem vários métodos para auxiliar na RCA, como a Árvore de Falhas – FTA (Figura 6), o Fluxograma de Antecedentes e a Árvore de Causas (AYYUB, 2014; PANDAGGIS, 2003).

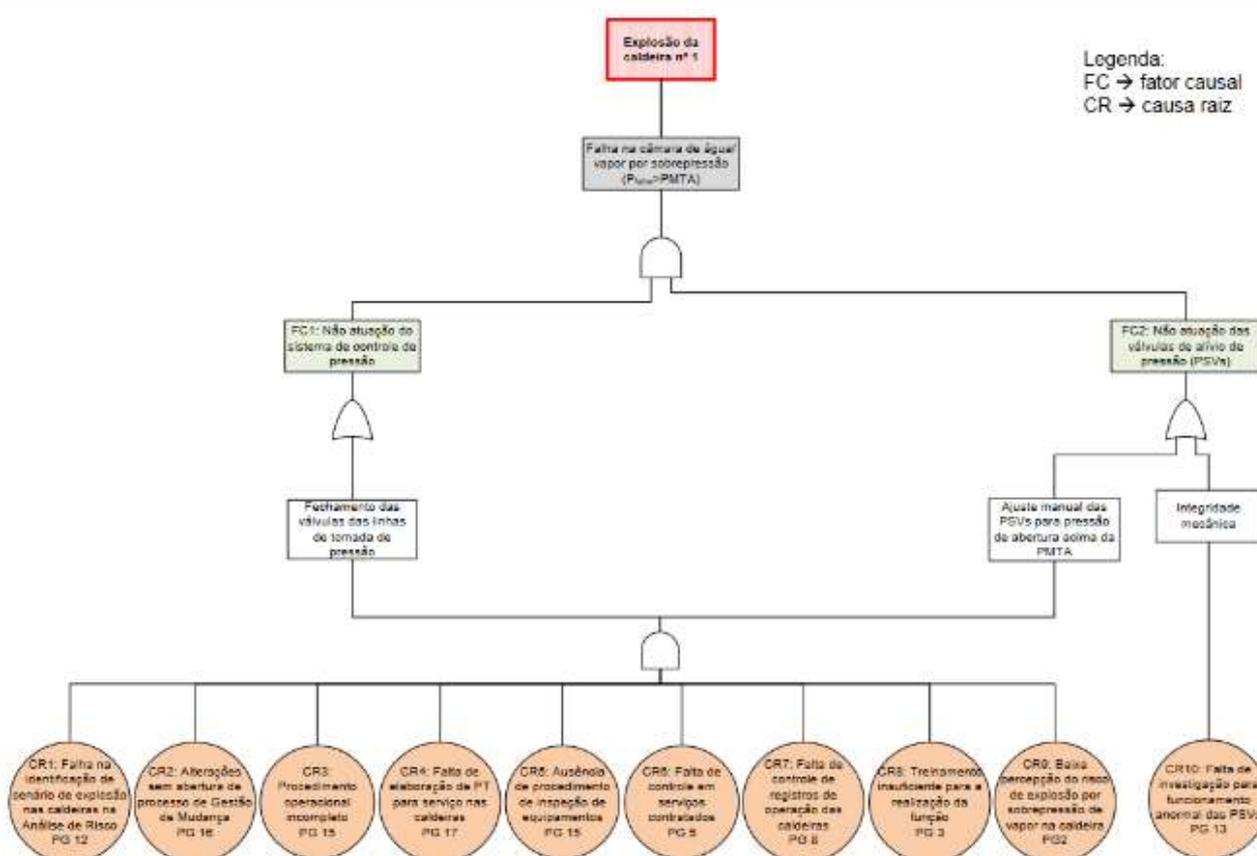
³ Incluídos os casos de negligência, imprudência e imperícia.



3.3.1 Críticas à RCA

Comparativamente à Teoria do Dominó e ao SCM, a RCA é menos restrita, uma vez que seus fatores causais não se limitam a níveis ou peças do dominó. Por outro lado, essa ausência de restrição a torna mais arbitrária quanto à escolha dos “eventos relevantes” da cadeia e ao critério de parada para alcançar a “causa raiz”, ou seja, quão longe do evento analisado a cadeia de eventos deve aprofundar (HOLLNAGEL, 2012). Normalmente, os eventos e as suas conexões são justificados pelo conhecimento angariado pelo analista do sistema sociotécnico. Conseqüentemente, um mesmo evento pode dar margem a diferentes conexões a depender da representação mental que cada indivíduo faz do evento (LEVESON, 2012).

Figura 6 – Exemplo de FTA, adotada durante investigação de explosão da caldeira em navio sonda



Fonte: ANP (2018)



Dessa forma, a abordagem sujeita-se, em demasiado, à subjetividade do investigador, uma característica inescapável às abordagens que utilizam a representação do acidente em forma de eventos encadeados. Por exemplo, na Figura 6, uma das “causas raízes” é a “falta de controle em serviços contratados” (CR6). Entretanto, não fica claro o porquê de a análise ser interrompida ao alcançar a CR6. Não estaria a equipe responsável pelo controle dos serviços subdimensionada ou não capacitada para esse tipo de atividade? Será que os procedimentos de controle dos serviços contratados eram adequados? Caso não, por quais motivos? Nesse caso, não foi fornecido parâmetro algum sobre o critério de parada.

Frequentemente, outros eventos ou explicações são deliberadamente excluídos ou não examinados de uma análise de acidente porque levantam questões constrangedoras para a organização ou suas contratadas ou são politicamente inaceitáveis (LEVESON, 2012) – por exemplo, atualmente praticamente inexistente apontamento de deficiências de órgãos governamentais (por ex.: órgãos de fiscalização) em relatórios de análise de acidente elaborados pelo próprio governo (LANDI; MONTEDO; LAHOZ, 2022). Por não se aprofundar suficientemente, fatores sistêmicos causadores de acidentes, que normalmente residem em altos níveis da hierarquia, podem ser negligenciados na abordagem RCA.

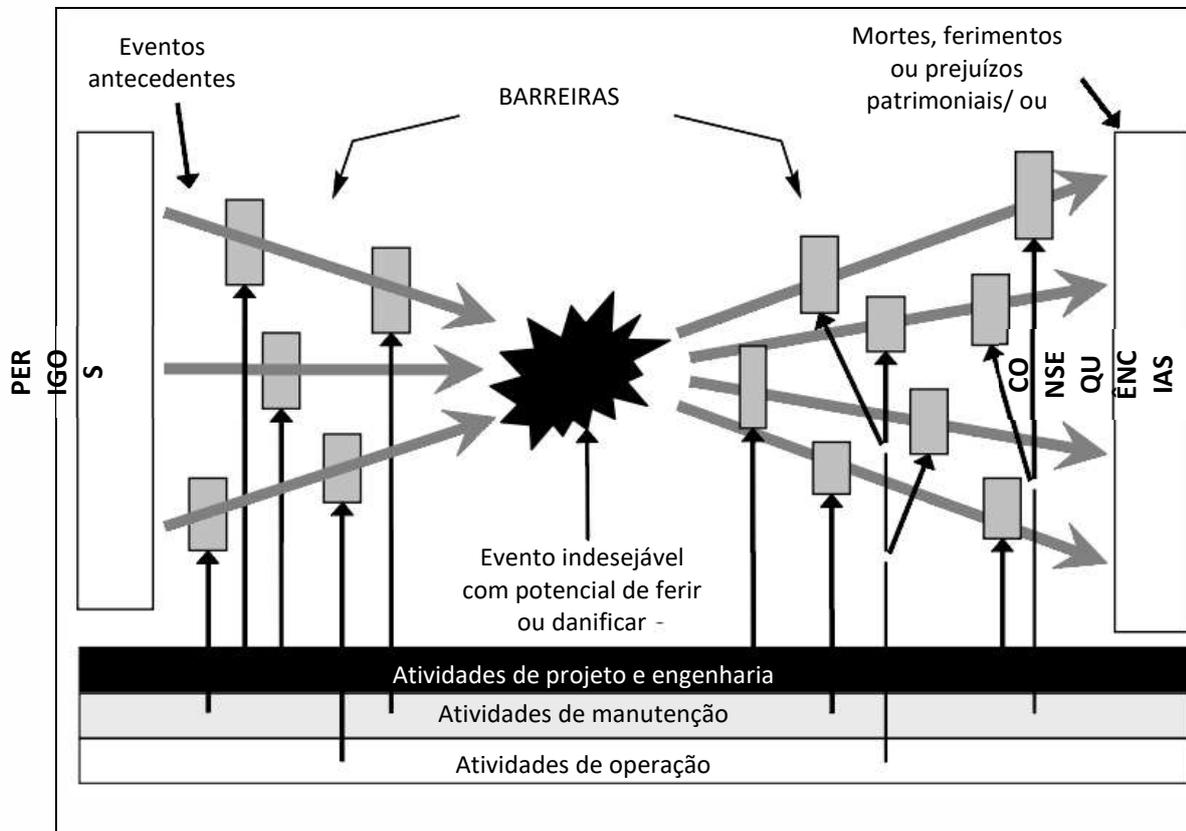
3.4 MODELO DA GRAVATA BORBOLETA

O modelo da gravata borboleta compartilha algumas semelhanças com o SCM e a RCA. Como visto na seção anterior, a RCA é utilizada para rastrear os antecedentes (causas) de um determinado evento, como um acidente. O modelo de gravata borboleta estendeu essa técnica para permitir conectar tanto os antecedentes quanto as consequências de determinado evento central (nó da gravata) (ALE *et al.*, 2008). Ao lado esquerdo do nó, geralmente em forma de árvore de falhas, são dispostos os antecedentes que, combinados, causaram o



evento central. Já o lado direito conterá as consequências do evento adverso, geralmente representadas por uma árvore de eventos (FU *et al.*, 2020) (Figura 7).

Figura 7 – Modelo da gravata borboleta



Fonte: adaptado de Hollnagel, Woods e Leveson (2006)

A investigação do acidente situa-se na análise das barreiras proativas que previnem as ameaças de se concretizar (do lado esquerdo) e das barreiras reativas que asseguram que, na ocorrência do evento central, os impactos sejam mitigados e contidos (do lado direito). Comparativamente à RCA e ao SCM, o modelo gravata borboleta se apresenta mais vantajoso ao compelir o analista a classificar as barreiras entre preventivas e protetivas e a refletir, principalmente, sobre a prioridade e importância das primeiras sobre as segundas (JACINTO; SILVA, 2010).

Baseado nessa abordagem, no Brasil, foi desenvolvido o Modelo de Análise e Prevenção de Acidentes, ou MAPA (ALMEIDA; VILELA, 2010;



ROCHA; VILELA, 2021).

3.4.1 Críticas ao modelo da Gravata Borboleta

Não obstante a sua evolução em relação aos antecessores, ambas as limitações apontadas para o SCM e para a RCA podem persistir nas investigações de acidentes, quais sejam: a subjetividade na seleção dos eventos que seriam relevantes para o acidente, a sujeição do analista a pressões para exclusão de eventos que podem “constranger” a organização e a insuficiência de interposição de barreiras em redundância para manter a segurança do sistema, em especial no longo prazo e em sistemas altamente dinâmicos.

3.5 SISTEMA DE ANÁLISE DE CLASSIFICAÇÃO DE FATORES HUMANOS – HFACS

Wiegmann e Shappell (2003) identificaram que o “erro humano” seria um fator contribuinte entre 70% e 80% dos acidentes aéreos. De acordo com os autores, os relatórios de investigações desses acidentes não eram construídos sobre uma base teórica do erro humano, onerando a identificação de padrões e estratégias de intervenção nesse setor. Nesse contexto, Wiegmann e Shappell (2003) desenvolveram o HFACS, a partir do SCM, com taxonomias ou “rótulos” para classificar os fatores causais de um acidente (Figura 8) (HULME *et al.*, 2019).

Devido a esse sistema de classificação, o HFACS é apontado como uma abordagem apropriada para estudo de múltiplos acidentes e identificação de tendências (ZHANG; JING; SUN, 2018). Não por acaso, o MTE, com uma base de milhares de investigações de âmbito nacional, adota uma abordagem estendida do HFACS – vide exemplo de fatores causais identificados na investigação conduzida pelo MTE em explosão de tanque de hipoclorito de sódio na Figura 9.



3.5.1 Críticas ao HFACS

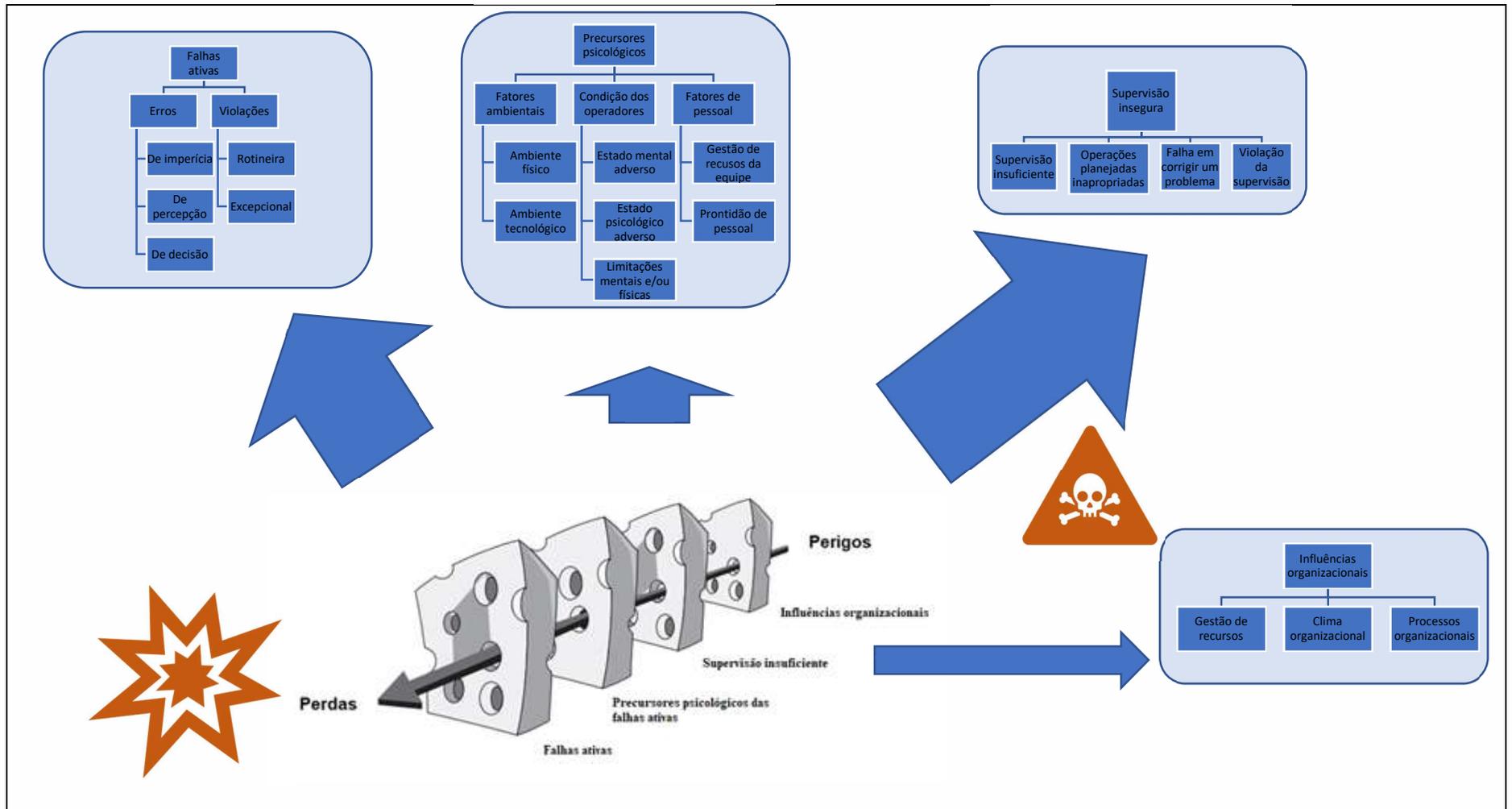
O HFACS, por ser baseado no SCM, padece das mesmas limitações discutidas na Seção 3.2.1. Acresça-se que, atualmente, as críticas residem no fato de o HFACS identificar menos fatores causais, em comparação com modelos mais modernos (IGENE; JOHNSON, 2020; LEVESON, 2012; SALMON; CORNELISSEN; TROTTER, 2012; ZHANG; JING; SUN, 2018), além de críticas em relação à sua limitada lista de fatores causais (FU *et al.*, 2020; GONCALVES FILHO; WATERSON; JUN, 2021), voltadas ao setor da aviação.

No tocante a essa lista de fatores causais, Stringfellow (2010) critica o fato de o HFACS possuir classificações que não se aprofundam o suficiente para que engenheiros e projetistas criem recomendações para resolver problemas organizacionais, através de design ou reengenharia do sistema. Segundo a autora, muitos dos fatores citados no HFACS não apontam para soluções e são apenas mais um rótulo para erro humano disfarçado:

[... Com HFACS, o investigador] pode interromper a análise ao alcançar a rótulos como “planejamento deficiente” e “pressão de tempo”. No entanto, o primeiro é apenas um ponto de parada conveniente que soa como uma falha sistêmica, mas pode-se argumentar que é realmente um ato inseguro – o que direcionaria os engenheiros do HFACS para o fundo da hierarquia do Queijo Suíço. [...] Na estrutura do HFACS, essas questões são pontos finais de investigação, pois ambos representam fatores no topo das Influências Organizacionais do HFACS.



Figura 8 – Classificações utilizadas pelo HFACS, sobre a representação gráfica do SCM



Fonte: adaptado de Salmon, Cornelissen e Trotter (2012)

Figura 9 – Trecho de investigação de explosão de tanque de hipoclorito de sódio contida no Sistema Federal de Inspeção do Trabalho SFIT – fatores causais inspirados em HFACS.

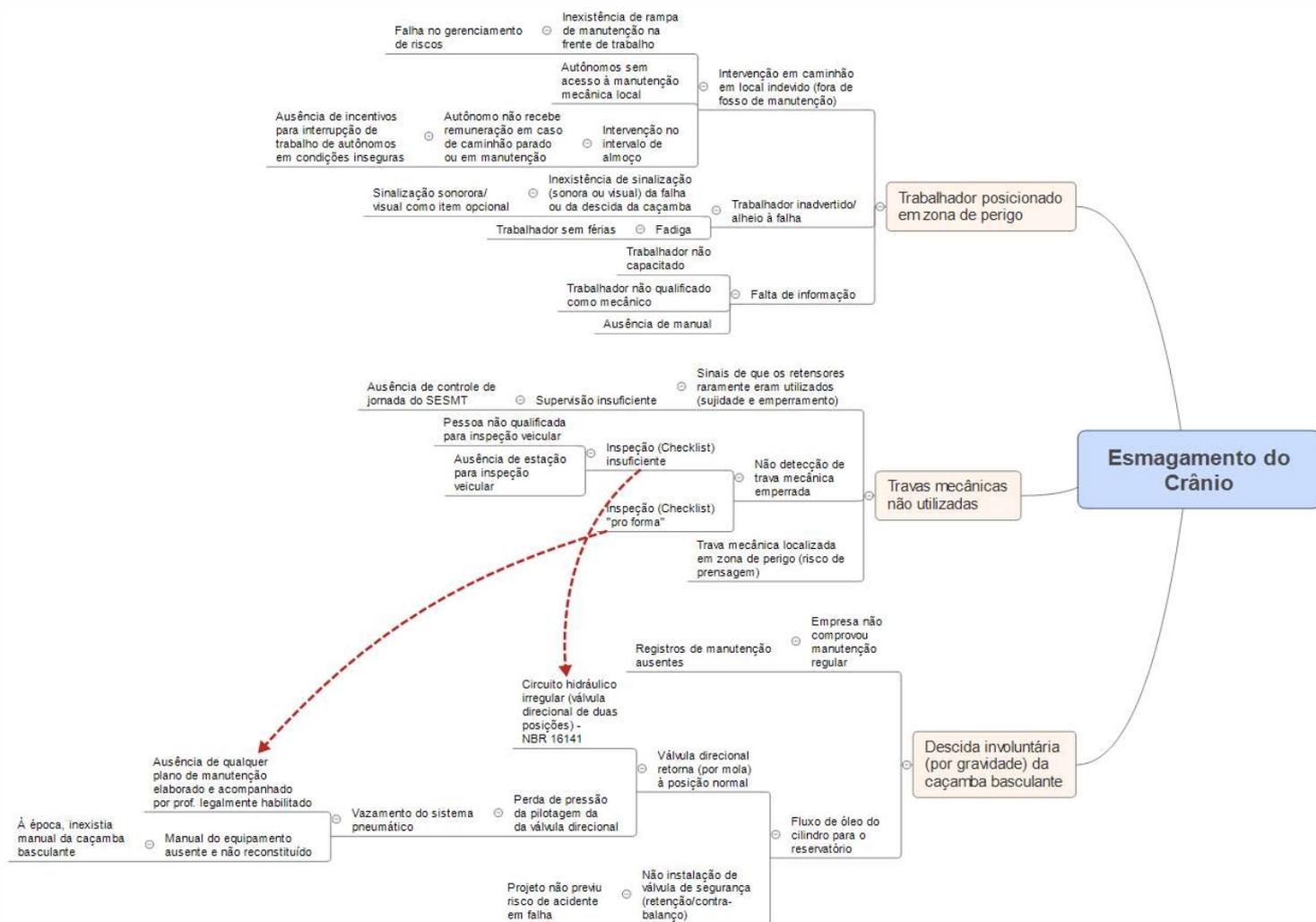
Tipo de Fator ▲	Fator Causal ▲	Descrição ▲
Fatores da Gestão de Projetos e Programas	Falha na concepção.	█████ optou por não utilizar tanque recomendado pela fornecedora para a fabricação de hipoclorito de sódio no local
Fatores da Gestão de Projetos e Programas	Programas gerenciais estabelecidos nas normas regulamentadoras não realizados	PPRA desatualizado e não elaboração do PCMSO
Fatores da Gestão do Ambiente	Ausência insuficiência inadequação de sinalização	Ausência de qualquer sinalização quanto à presença de gases inflamáveis (hidrogênio) no interior do tanque.
Fatores da Gestão do Trabalho	Ausência de informação sobre os riscos e mecanismos de controle (desproteção cognitiva).	Os trabalhadores não estavam informados acerca da presença de gases inflamáveis no interior do tanque. Falta sinalização e informação dos riscos por parte do █████
Fatores da Gestão do Trabalho	Objetivos ou metas de trabalho contraditórias / conflituosas.	Ao mesmo tempo em que a █████ solicitava que o tanque estivesse vazio e limpo antes de qualquer manutenção, isso ia de encontro à necessidade de manter a disponibilidade de água por parte do █████ que liberou o tanque apenas às 18h00 (e mesmo assim, ainda com 1.000 litros de hipoclorito de sódio e sem realizar a limpeza, portanto).
Fatores da Organização e Gerenciamento da Relação entre Empresas	Compartilhamento de informações deficiente entre empresas.	Ausência de repasse do risco de formação de gases inflamáveis no tanque de hipoclorito de sódio à terceirizada
Fatores da Organização e Gerenciamento de Materiais e Meios de Trabalho	Falta, indisponibilidade ou inadequação de máquinas ou equipamentos para execução da atividade.	Ferramenta inadequada (esmerilhadeira), que gera calor, para abrir tanque com gases inflamáveis em seu interior.
Fatores da Organização e Gerenciamento de Materiais e Meios de Trabalho	Material deteriorado ou defeituoso.	Apenas houve uso da esmerilhadeira em razão de os parafusos do tanque de hipoclorito de sódio estarem enferrujados, sem manutenção.

Fonte: Brasil (2022)

De fato, não seria exagero afirmar que a maioria das investigações conduzidas pelo MTE ao representar os acidentes, geralmente, interrompe a cadeia de eventos ao alcançar fatores causais organizacionais. Vide, por exemplo, que maiores aprofundamentos foram interrompidos na análise de acidentes do MTE exibida na Figura 10 – por que a análise se interrompeu ao alcançar a “falha” no gerenciamento de riscos? Não ficou claro, nos relatórios, o que causou essa “falha” (por ex.: abordagem de identificação de riscos inadequada, falta de capacitação ou experiência dos responsáveis pelo gerenciamento dos riscos, falta de sistema de gerenciamento de incidentes ou de riscos, ou algum outro motivo?) ou a razão de a análise ser interrompida nesse ponto.



Figura 10 – Exemplo de árvore de causa, adotado na investigação de acidente fatal provocado por descida involuntária de caixa de carga (caçamba) de caminhão basculante.



Fonte: Brasil (2022)



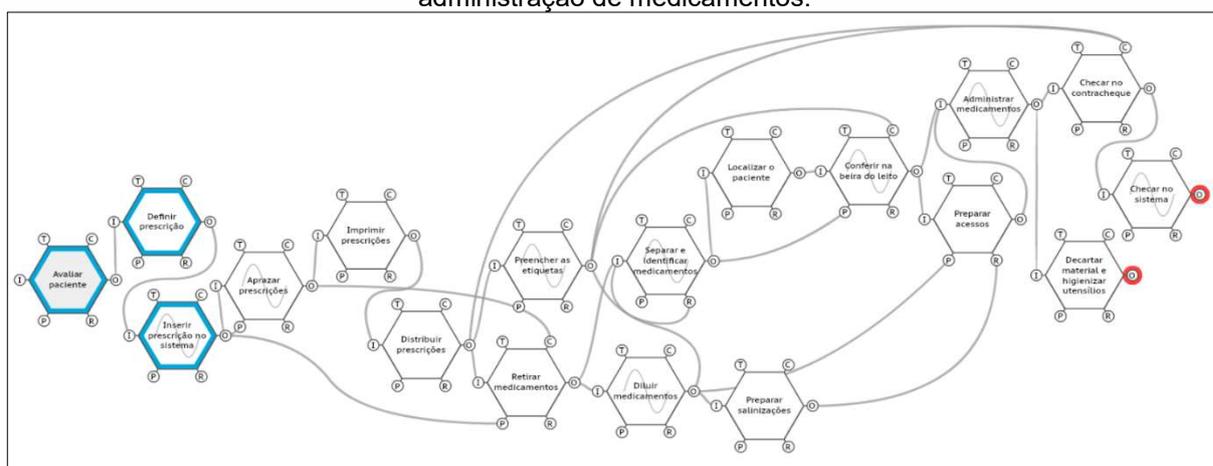
3.6 MÉTODO DE ANÁLISE DE RESSONÂNCIA FUNCIONAL – FRAM

O desenvolvimento do Método de Análise de Ressonância Funcional (FRAM) foi motivado pelas limitações percebidas ao utilizar abordagens fundamentalmente determinísticas e probabilísticas para entender o comportamento de sistemas complexos (PATRIARCA *et al.*, 2020), em especial quando envolvem a questão da “cultura da segurança” (HOLLNAGEL, 2012). FRAM foi desenvolvido tanto para análise de acidentes quanto como ferramenta de análise de risco (HOLLNAGEL, 2012; YOUSEFI *et al.*, 2019).

Uma investigação baseada no FRAM não se inicia com a busca por uma causa, mas tentando entender o que deveria ter acontecido em uma situação rotineira e, então, utilizando esse entendimento para explicar por qual motivo houve um resultado diferente (HOLLNAGEL, 2012; PRIORI; SAURIN, 2019)

O FRAM representa graficamente os sistemas como uma rede de funções inter-relacionadas (Figura 11), as quais, embora projetadas para funcionar de determinada maneira, podem exibir vários graus de variação de desempenho (HOLLNAGEL, 2012). A variabilidade de desempenho de qualquer componente do sistema pode "ressoar" com aquela dos elementos restantes e produzir uma variação emergente muito alta para controlar, resultando em um acidente (UNDERWOOD; WATERSON, 2012).

Figura 11 – Exemplo de diagrama FRAM, adotado para modelar processo de prescrição e administração de medicamentos.



Fonte: Priori e Saurin (2019)

3.6.1 Críticas ao FRAM

Comparativamente com técnicas tradicionais, FRAM exige conhecimento profundo da técnica e mais tempo e esforço por parte do analista (DE LINHARES; MAIA; FERREIRA FRUTUOSO E MELO, 2021; HOLLNAGEL, 2012) o que pode ser um problema a depender do tempo disponível para concluir uma investigação. Além dessas questões, estudos comparativos de abordagens de análise de acidente concluíram que FRAM identifica menos fatores causais do que outras técnicas (vide por ex. KAYA, 2021; QIAO; LI; LIU, 2019; YOUSEFI *et al.*, 2019).

3.7 MODELO DO MAPA DE ACIDENTE – ACCIMAP

O Accimap, traduzido por autores nacionais como Mapa do Acidente (GONÇALVES FILHO; QUEIROZ, 2019), foi desenvolvido por Rasmussen (1997) e aprimorado nos anos seguintes (RASMUSSEN; SVEDUNG, 2000). É considerado o modelo mais sofisticado em termos de níveis hierárquicos conjugados com a cadeia-de-eventos (LEVESON, 2012).

Segundo o seu idealizador, um sistema sociotécnico confere certo grau de liberdade a seus agentes (por ex.: operadores, gerentes e máquinas), porém confinado a limites (ou restrições) de ordem administrativa, funcional e de segurança (Figura 12).

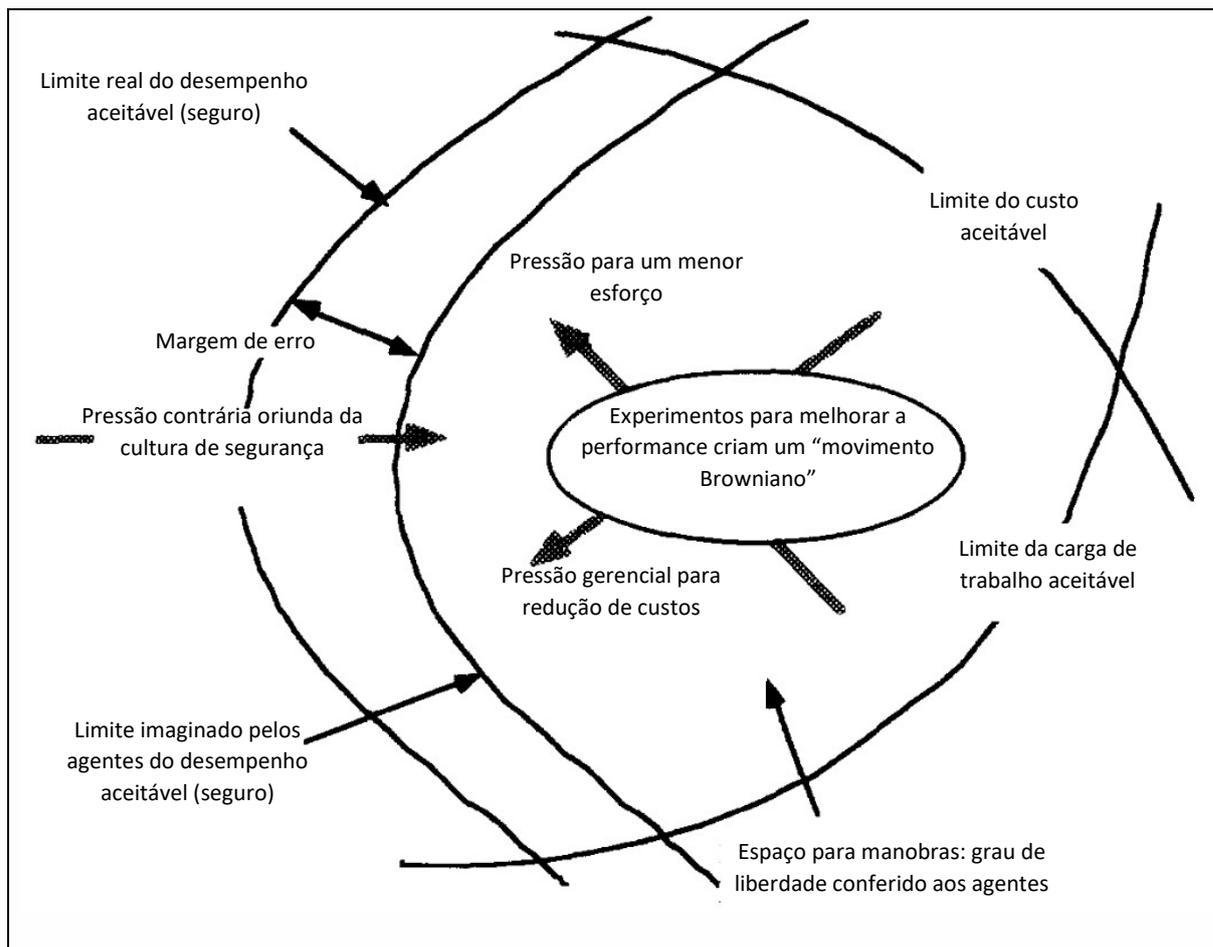
Pressões de redução custo por parte da gerência e pressões de redução de esforço por parte dos agentes, inevitavelmente, fazem o comportamento da empresa – representado pela elipse ao centro da Figura 12 – migrar paulatinamente em direção a uma condição mais insegura, ou seja, aos limites do desempenho aceitável. A fim de evitar acidentes, esforços incessantes da organização seriam exigidos, por meio de uma cultura de segurança, para gerar uma pressão contrária a essa degradação da segurança (RASMUSSEN, 1997).

Deste modo, Rasmussen (1997) pugna por uma abordagem que, ao contrário de representar acidentes como sucessões de eventos, atos e erros, concentre-se nos



mecanismos que geraram esses eventos. A sua solução é representar o acidente como resultado de interações conflitantes entre os diversos níveis de um sistema: 1. Governo; 2. Corpo regulatório; 3. Gestão da organização; 4. Gestão técnica e operacional; 5. Processo físico e 6. Equipamentos e ambiente (GONÇALVES FILHO; QUEIROZ, 2019).

Figura 12 – Na presença de diversas pressões, o comportamento da empresa irá, provavelmente, migrar para o limite do desempenho aceitável, em busca de um menor custo e esforço.



Fonte: adaptado de Rasmussen (1997)

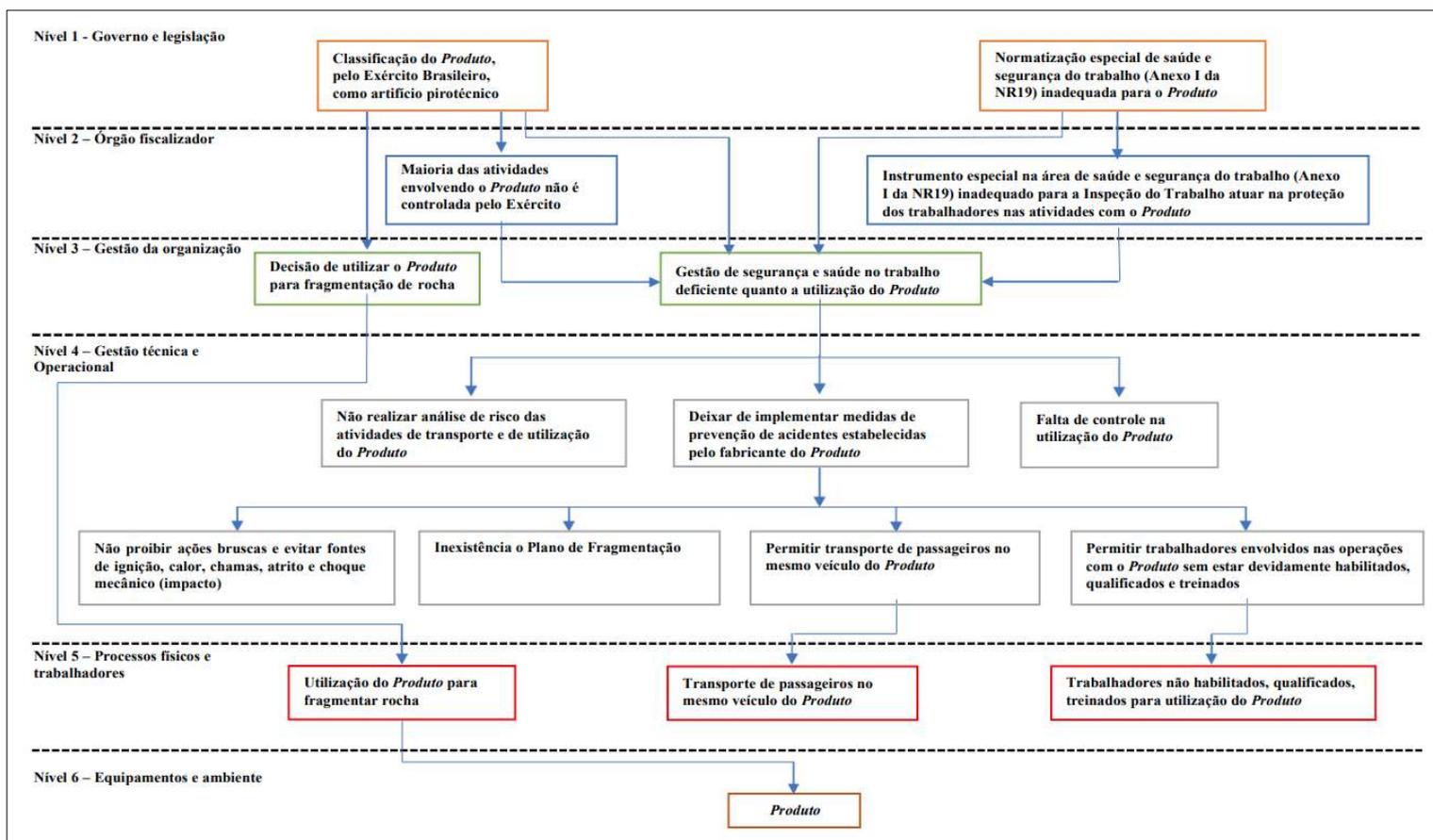
Observa-se que o Accimap inovou ao permitir que o trajeto desde o acidente até os fatores causais não se limitasse a um sentido único, permitindo laços de repetição (ou retroalimentação) entre os elementos do Mapa do Acidente (por ex.: antes de um acidente, o corpo regulatório pode interagir inúmeras vezes com o



governo e vice-versa) (RASMUSSEN; SVEDUNG, 2000).

A Figura 13 contém um exemplo de Mapa de Acidente construído em investigação de explosão acidental de artifício pirotécnico – leia-se, um produto não classificado como explosivo *stricto sensu*⁵⁹. O artifício pirotécnico, identificado no mapa como “Produto”, era empregado por empresa para desmonte de rochas e explodiu durante o seu transporte.

Figura 13 – Exemplo de mapa de acidente (Accimap), adotado em investigação de explosão acidental de artifício pirotécnico (ou seja, não classificado como explosivo *stricto sensu*), denominado “Produto”, empregado por empresa para desmonte de rochas



Fonte: adaptado de Brasil (2022)

⁵⁹ Segundo a Norma Regulamentadora – NR 19, a classificação de um produto como explosivo é realizada pela Diretoria de Fiscalização de Produtos Controlados do Exército Brasileiro. No presente caso, apesar da óbvia utilização para desmonte de rochas, o Exército Brasileiro classificou o produto como pirotécnico.



3.7.1 Críticas ao Accimap

O Accimap, por ser uma extensão do SCM, sofre com as mesmas limitações desta abordagem. Por exemplo, em que pese ter avançado para entender o “porquê” de os fatores proximais ocorrerem, o Accimap não se aprofunda nos porquês dos fatores posicionados nos níveis mais elevados, como os organizacionais (STRINGFELLOW, 2010). Igualmente, pode-se citar que, nesse tipo de representação, ainda se faz presente a figura das “causas raízes” (LEVESON, 2012) e de todos os seus efeitos deletérios, como a subjetividade do investigador na escolha dos “eventos relevantes” e do “critério de parada”. Por fim, e provavelmente o mais grave, o “erro humano”, inevitavelmente, continuará sendo representado como um dos fatores causais que antecedem ao acidente (STRINGFELLOW, 2010).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como visto na Seção anterior, os modelos tradicionais de análise de acidente possuem características que: i) limitam o potencial de aprendizado de um evento adverso; ii) são influenciados, em um nível indesejado, pela subjetividade do investigador do acidente – tanto da seleção dos eventos que seriam “relevantes” para o acidente quanto do “critério de parada” da cadeia de eventos; e iii) sofrem do viés retrospectivo, inevitavelmente representando o “erro humano” ou “ato inseguro” como um dos fatores contribuintes do acidente, não fornecendo insumos suficientes para redesenho do ambiente.

Dessa forma, urge-se a adoção de modelo de análise de acidente capaz de lidar adequadamente a toda a complexidade do ambiente de trabalho atual, o que inclui interação entre homem, máquina, algoritmo e ambiente. Esse modelo deve ser capaz de explorar, de forma mais efetiva, o potencial de aprendizado de um sinistro; e mitigar, tanto quanto possível, a subjetividade e o viés retrospectivo do investigador do acidente.



4.1 STAMP

A Análise de Acidente Fundamentada na Teoria Geral de Sistemas (STAMP) tem-se demonstrado mais adequada para alcançar esse desiderato. Para essa abordagem, ao se analisar infortúnios laborais, importa mais identificar: i) os perigos envolvidos na atividade; ii) os possíveis controles para prevenção desses perigos; e iii) quais desses controles inexistiam ou não foram eficazes. Assim, nota-se que, apesar de relevantes, possuem menor importância: i) a cadeia de eventos e; ii) a busca exaustiva de todos os fatos.

Desse modo, ao se concentrar nos controles, não em eventos, reduz-se a subjetividade e obtém-se uma análise mais abrangente (mais fatores causais e recomendações) e mais confiável (similaridade de fatores causais identificados por diferentes analistas) dos eventos adversos, como demonstram os estudos que compararam STAMP com outras abordagens, como o SCM (HICKEY; EIKEMA HOMMES, 2013), o RCA (ALTABBAKH *et al.*, 2014; CANHAM *et al.*, 2018), o FRAM (ALVARENGA; FRUTUOSO E MELO; FONSECA, 2014), o Accimap (YOUSEFI *et al.*, 2019) e outros (KAZARAS; KIRYTOPOULOS; RENTIZELAS, 2012; MOGLES; PADGET; BOSSE, 2018; QIAO; LI; LIU, 2019; RAMAN *et al.*, 2016). Outrossim, STAMP, ao colocar em perspectiva todas as informações (*feedbacks*), restrições e controles disponíveis aos operadores à época do evento adverso, reduz o viés retrospectivo.

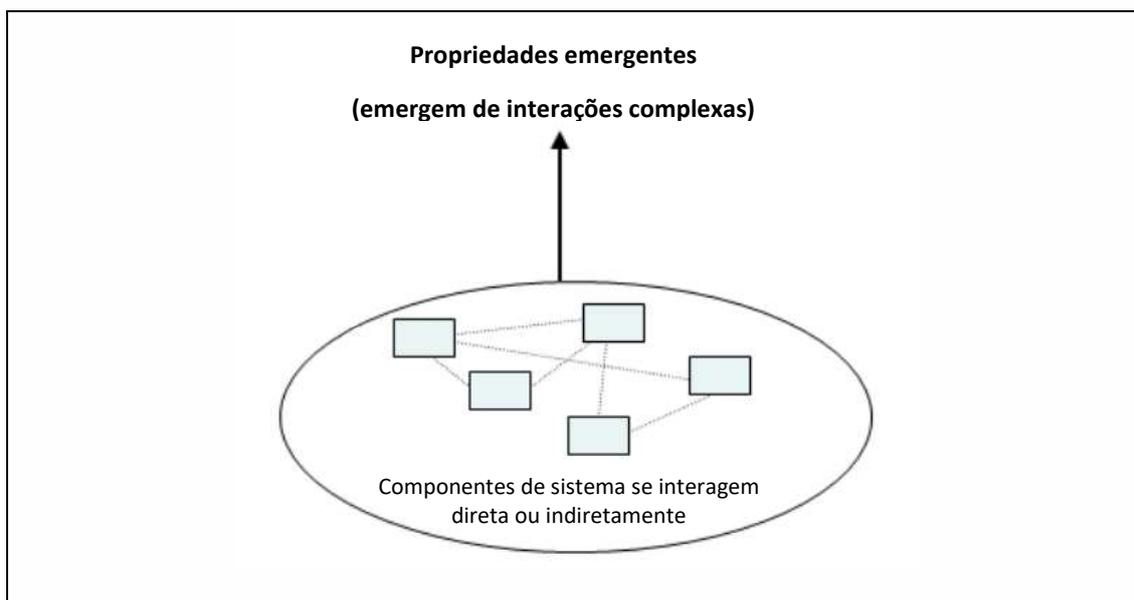
Nota-se que STAMP propõe que a segurança e a confiabilidade não se confundem e que, não raro, são contraditórios, ou seja, uma maior confiabilidade pode gerar uma menor segurança (LEVESON, 2019). Por exemplo, os religadores automáticos de rede de distribuição elétrica, apesar de diminuírem a duração das interrupções elétricas (maior confiabilidade), podem colocar em risco eventuais operadores que estejam intervindo na rede elétrica (menor segurança) (SILVA *et al.*, 2018).

A confiabilidade pode ser definida como a capacidade de um sistema ou componente de cumprir suas funções de projeto, sob condições designadas, por um período especificado, geralmente sendo mensurada usando probabilidade (AYYUB, 2014). Confiabilidade seria, então, uma propriedade “de componente”, passível de ser analisada isoladamente (por ex.: se uma válvula de determinada planta vai satisfazer sua



especificação no tempo e sob determinadas condições), enquanto a segurança é uma propriedade “emergente”, que “emerge” das inúmeras interações possíveis (Figura 14). Para STAMP, não é possível deduzir se determinado componente do sistema – ou subsistema – é seguro, isoladamente, sem considerar o contexto no qual está inserido. Por exemplo, a segurança de uma válvula dependerá das interações que essa válvula tiver com outros componentes de uma planta (LEVESON, 2012).

Figura 14 – Propriedades emergentes de um sistema.



Fonte: adaptado de Leveson (2019)

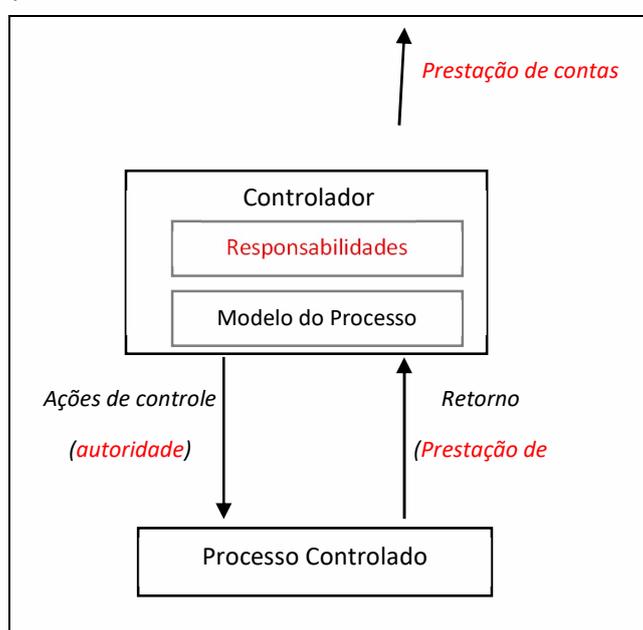
Verifica-se, portanto, que a segurança deve considerar questões não quantificáveis, como erros de projeto, designs inadequados, interações disfuncionais e constantes pressões no sistema sociotécnico que o migram para uma condição de risco. Geralmente, ferramentas de avaliação probabilística de risco (PRA) consideram apenas fatores imediatos na geração de acidentes, ignorando, por exemplo, o papel que pressões podem desempenhar nesses eventos (LEVESON, 2012), podendo não representar a segurança fidedignamente. De mais a mais, a PRA pode se mostrar inadequada para avaliação de risco em novas tecnologias, com pouco ou nenhum dado histórico de acidentes para subsidiar os cenários, frequência e severidade de acidentes.

Nesse sentido, a segurança dependerá da aplicação de restrições no



comportamento e interações dos componentes do sistema. A forma que STAMP aplica essas restrições aos componentes é através da hierarquia, comunicação e controle (LEVESON, 2012), representados em uma hierarquia de controle da segurança (Figura 15). Os sistemas não são tratados como estáticos, mas como processos dinâmicos que estão continuamente se adaptando para atingir seus objetivos e reagir às mudanças em si mesmos e em seu ambiente (LEVESON, 2012).

Figura 15 – Ciclo de controle de processo – o controlador (operador, algoritmo, gestor) realiza ações no processo controlado, as quais geram retornos – acidentes podem ocorrer quando o modelo do processo não representa fielmente o processo controlado devido a retorno deficiente.



Fonte: adaptado de Leveson (2019)

Ao modelar pelo STAMP, deve-se questionar se os retornos – ou *feedbacks* –, que influenciam as ações dos controladores humanos ou computacionais, são suficientes para permitir um controle adequado do processo, especialmente quando sujeitos a distúrbios externos.

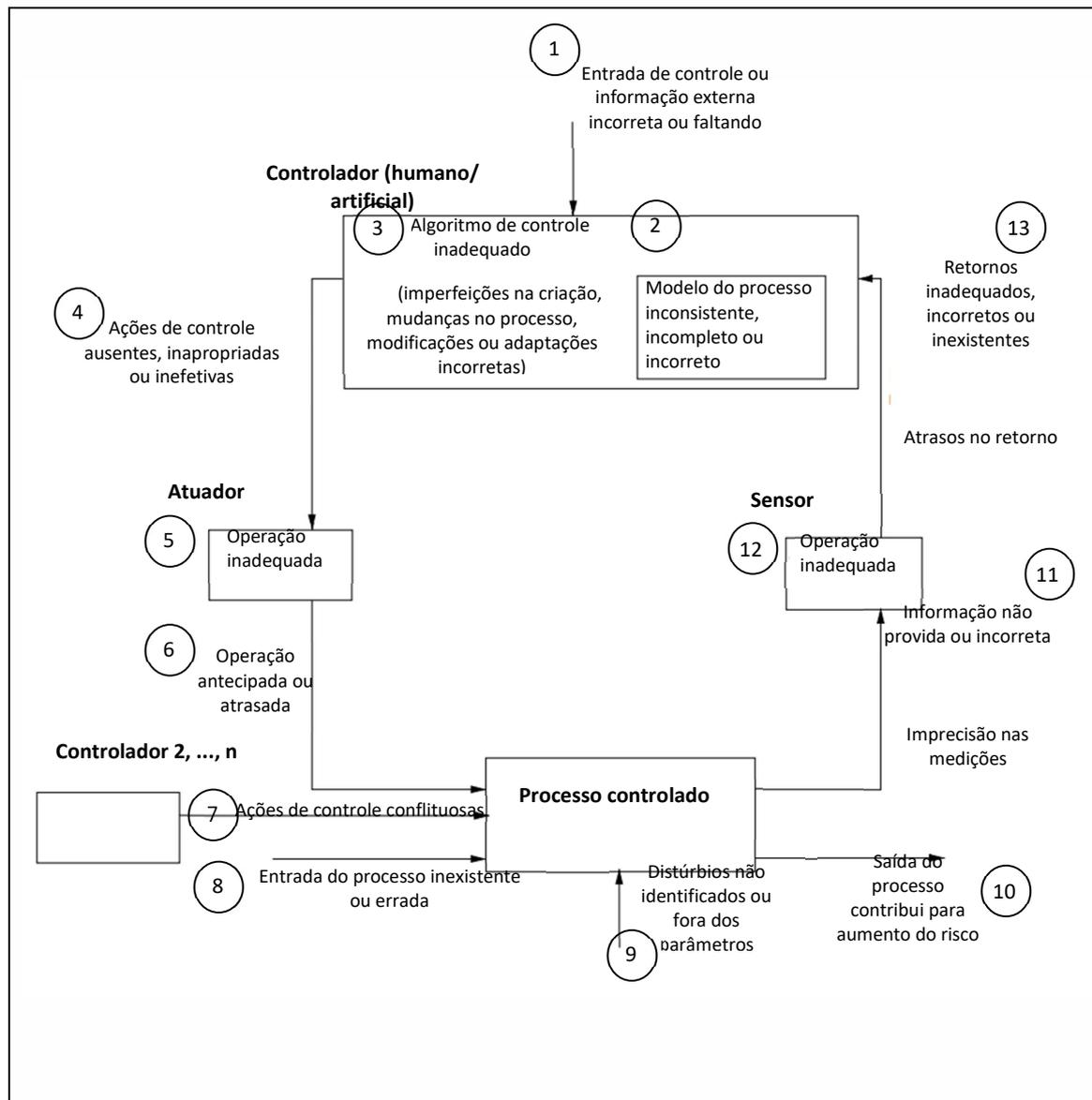
Nesse tipo de modelagem, geralmente, os acidentes ocorrem quando o “modelo” que o operador imagina do processo (modelo mental) não corresponde ao processo controlado, e, como resultado (LEVESON, 2012): i) Comandos de controle incorretos ou inseguros são dados; ii) As ações de controle necessárias (por segurança) não são



fornecidas; iii) Comandos de controle potencialmente corretos são fornecidos na hora errada (muito cedo ou muito tarde), ou iv) O controle é interrompido muito cedo ou aplicado por muito tempo.

A Figura 16 contém os diferentes fatores causais que podem levar a um acidente dentro de uma estrutura de controle básica.

Figura 16 – Possíveis controles inadequados que podem colocar em risco a segurança.



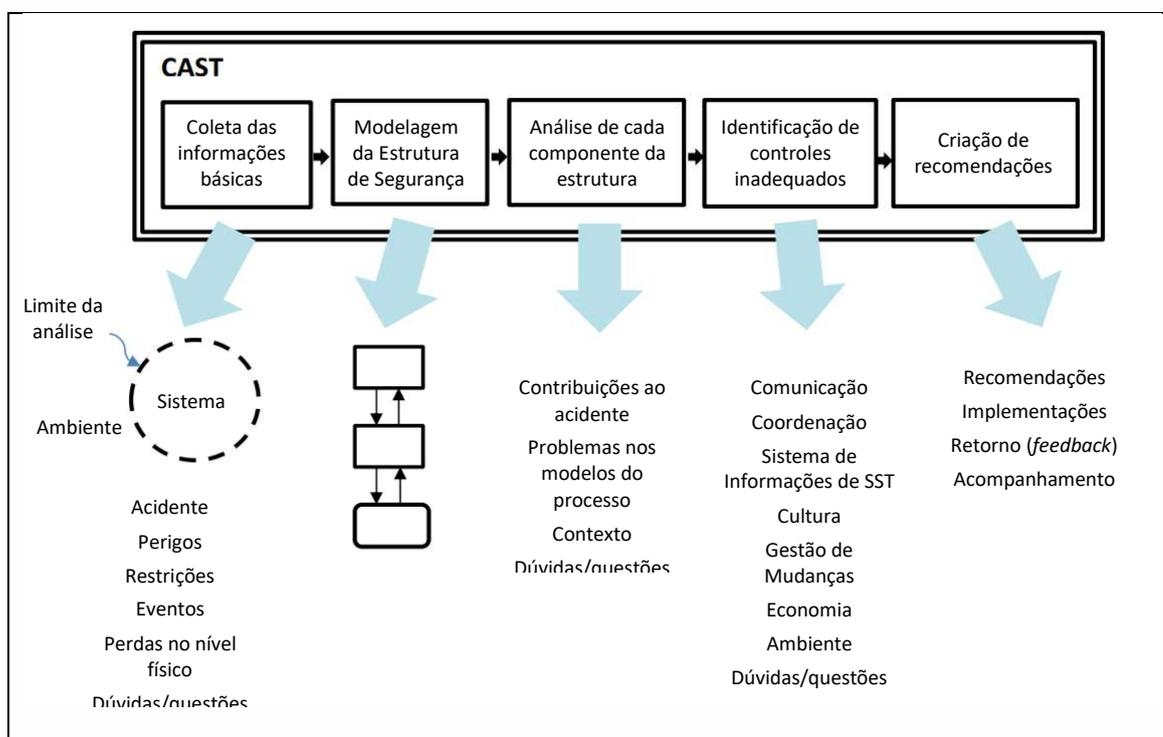
Fonte: adaptado de Leveson (2012)



4.2 ANÁLISE CAUSAL BASEADA EM STAMP – CAST

Enquanto STAMP fornece a fundamentação teórica – principalmente os conceitos de hierarquia, comunicação e controle – CAST oferece um processo, baseado em STAMP, que auxilia a documentar e a formular questões a serem respondidas em relação a um acidente. A Figura 17 apresenta a sequência para realização da CAST.

Figura 17 – Sequência básica da CAST



Fonte: Leveson (2019)

Em síntese, o analista deve atender os seguintes passos (LEVESON, 2019):

Passo 1: coletar as informações básicas para realizar a análise:

- i. definir o sistema envolvido e o limite da análise;
- ii. descrever a perda e o estado perigoso que o levou a isso
- iii. a partir do perigo, identificar as restrições de segurança no nível do sistema necessárias para evitar o perigo (os requisitos e restrições de



- segurança do sistema).
- iv. descrever o que aconteceu (os eventos) sem conclusões, julgamentos ou culpa (por exemplo, não utilizar termos como “trabalhador errou”, “trabalhador distraiu-se”, “trabalhador arriscou-se”, optando por fatos, como “trabalhador ingressou com a mão em zona de prensagem”, “trabalhador não conectou cinto de segurança” etc.) e gerar perguntas que precisam ser respondidas para explicar por que esses fatos ocorreram (por ex.: “a máquina era dotada de dispositivos de segurança?”, “havia proteção coletiva contra quedas?”).
 - v. analisar a perda física em termos de equipamentos físicos e controles, os requisitos do projeto físico para prevenir o perigo envolvido, os controles físicos (dispositivos de emergência e segurança) incluídos no projeto para prevenir este tipo de acidente, falhas e interações inseguras levando ao perigo, controles físicos ausentes ou inadequados e quaisquer fatores contextuais que influenciaram os eventos.

Passo 2: modelar a estrutura de controle de segurança (ECS) existente para este tipo de perigo, o que inclui refletir acerca da responsabilidade (deveres) de cada elemento e os controles (autoridade) e *feedbacks* necessários para cumprir essa responsabilidade.

Passo 3: examinar os componentes da ECS para determinar por que eles não foram eficazes na prevenção da perda: Começando na parte inferior da estrutura de controle, mostrar o papel que cada componente desempenhou no acidente e a explicação de seu comportamento (por qual motivo eles fizeram o que fizeram e por que acharam que era a coisa certa a fazer na ocasião). Deve-se questionar: se a responsabilidade atribuída a cada elemento era acompanhada do devido controle (autoridade), se os controles eram adequados para a responsabilidade atribuída, se os retornos permitiam o controle tempestivo e adequado das situações de perigo, a influência do contexto (distúrbios) nos controles, responsabilidades e *feedbacks*, entre outras indagações.

Passo 4: identificar lacunas ou inadequações na ECS como um todo (fatores



sistêmicos gerais) que contribuíram para a perda.

Passo 5: criar recomendações para alterações na estrutura de controle para evitar uma perda semelhante no futuro. Se apropriado, criar um programa de melhoria contínua para esse perigo como parte de seu programa geral de gerenciamento de risco.

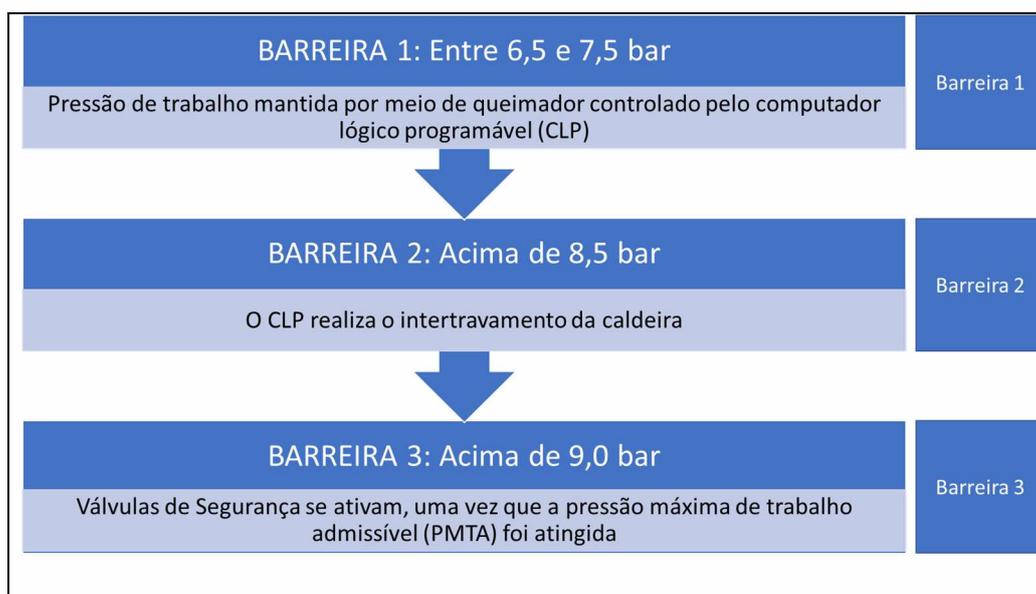
4.3 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE CAST

Um exemplo da aplicação dessa metodologia, é explicado com detalhes por Landi, Montedo e Lahoz (2022). Em 2017, durante os preparativos para inspeção de caldeira em sonda marítima, o equipamento explodiu vitimando fatalmente três trabalhadores que acompanhavam as atividades, incluindo um engenheiro.

Usando o manômetro da caldeira como referência, os operadores identificaram que o equipamento, ao ser iniciado, aparentava funcionar de forma anormal, acionando as válvulas de segurança (aliviando pressão) abaixo de 4 bar, antes de alcançar a pressão de operação, entre 6,5 e 7,5 bar. Na tentativa de corrigir a situação, os operadores reiniciaram a caldeira diversas vezes até que, em uma dessas tentativas, o sistema explodiu. A Figura 18 apresenta, resumidamente, as três barreiras principais para prevenção da explosão da caldeira, sendo as válvulas de segurança (PSV) – barreira 3 – a última delas.



Figura 18 – Esquema das barreiras de segurança da caldeira



Fonte: o autor, com base na ANP (2018)

Com tantas barreiras em redundância, como prescrito pelas técnicas tradicionais de prevenção de acidentes, como foi possível essa explosão ocorrer?

4.3.1 Análise do órgão governamental

Após o acidente, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis conduziu uma investigação⁶⁰ e identificou que diversos dispositivos de segurança da caldeira – controle do queimador, pressostatos, válvulas de segurança – foram desabilitados ou inutilizados sem que os sucessivos operadores tomassem conhecimento (ANP, 2018).

Como informado acima, em testes da caldeira, os operadores imaginavam que as PSV acionavam em pressões menores que 4 bar. Sem *feedback* adequado da caldeira, os obreiros desconheciam que, antes dos testes, os registros manuais das tomadas de pressão, que alimentavam pressostatos e manômetro da caldeira, estavam completamente fechados, anulando esses dispositivos (Figura 19, 'a') (ANP, 2018). Além disso, parte dos

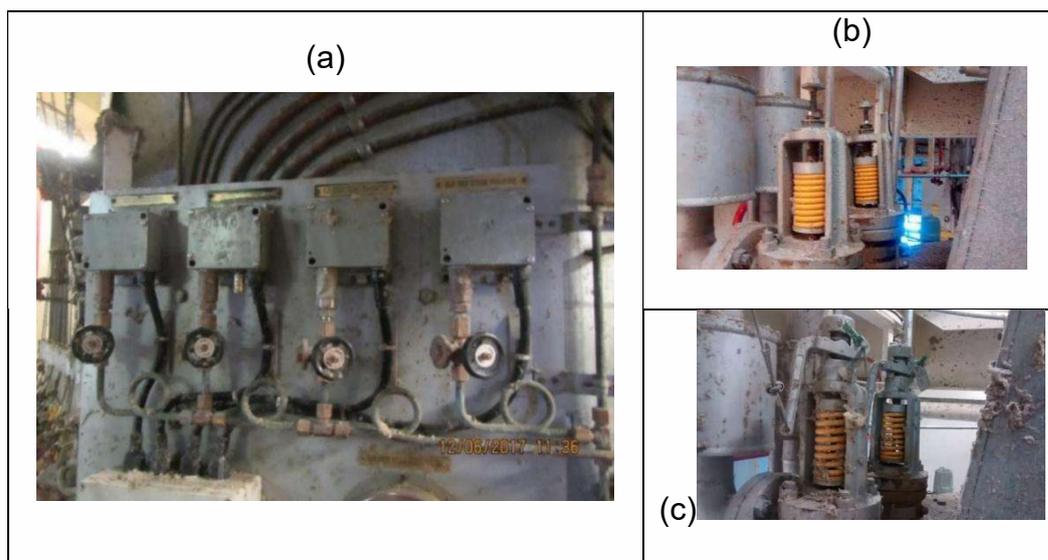
⁶⁰ O relatório foi tornado público pela ANP no sítio <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional-e-meio-ambiente/sonda-norbe-viii>, acesso em 24 abr. 2023.



registros manuais não era estanque, apresentando vazamentos e permitindo que frações de pressão fossem lidas pelos dispositivos de segurança e manômetro, reduzindo substancialmente os valores reais e concedendo aparência de funcionalidade (ANP, 2018).

Como não houve documentação das intervenções na caldeira, especula-se que, com as leituras erradas de informações de pressão e com o fim de trazer as PSV à configuração original (9 bar), durante os sucessivos testes, um operador tenha comprimido completamente as molas das PSV (vide Figura 19, 'b', em comparação com 'c'), uma vez que os lacres contra violação haviam sido removidos (MARINHA DO BRASIL, 2017). A Figura 20 representa o sistema imaginado pelo operador (modelo mental do operador), de acordo com os *feedbacks* disponíveis, e o que realmente acontecia no processo controlado.

Figura 19 – Componentes físicos da caldeira. Em (a) as válvulas manuais das tomadas de pressão que alimentam pressostatos e manômetro da caldeira; em (b) as molas das PSV totalmente comprimidas, sem lacres contra violação e; em (c) molas de PSV caldeira adjacente que não sofreram intervenção, ainda com os lacres.



Fonte: Marinha do Brasil (2017)

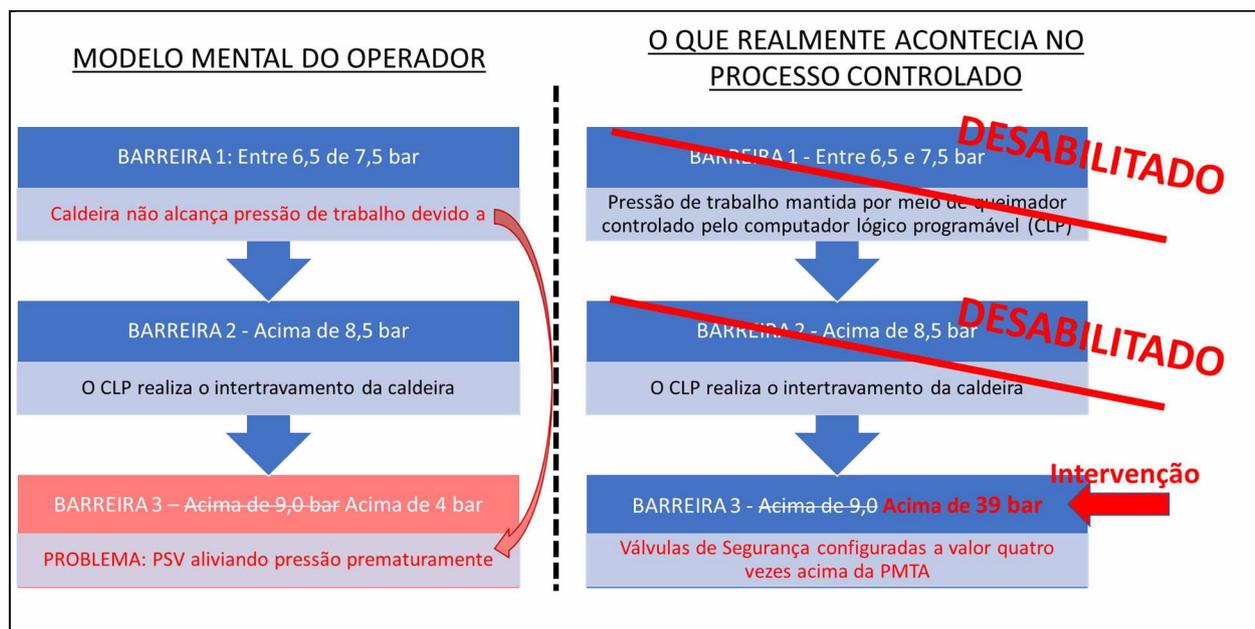
Considerando que os pressostatos e manômetros (barreiras 1 e 2) encontravam-se desabilitados devido ao fechamento dos registros manuais, essa intervenção nas PSV (barreira 3) findou por anular a última barreira que protegia os trabalhadores e instalação de uma explosão. Testes posteriores calcularam que as intervenções configuraram as PSV



para aliviar a 39 bar (ANP, 2018), mais de quatro vezes a pressão máxima de trabalho admissível – PMTA.

Nota-se que os achados da ANP (2018), agrupados no Quadro 1, se limitaram a aspectos documentais (análise de risco insuficiente, ausência de procedimentos, ausência de permissões de trabalho falta de controle de registros de operação da caldeira), gerenciais (falta de controle dos serviços contratados) e humanos (treinamento insuficiente, baixa percepção de risco).

Figura 20 – Modelo mental do operador *versus* realidade



Fonte: o autor, com base na ANP (2018)

Quadro 1 – Resumo das causas do acidente, segundo órgão governamental

Fatores Causais	Causas Intermediárias	Causas Raiz
FC1: Não atuação do sistema de controle de pressão	Fechamento das válvulas das linhas de tomada de pressão	CR1: Falha na identificação de cenário de explosão nas caldeiras na Análise de Risco CR2: Alterações sem abertura de



FC2: Não atuação das válvulas de alívio de pressão (PSVs)	Ajuste manual das PSVs para pressão de abertura acima da PMTA	<p>processo de Gestão de Mudança</p> <p>CR3: Procedimento operacional incompleto</p> <p>CR4: Falta de elaboração de Permissão de Trabalho para serviço nas caldeiras</p> <p>CR5: Ausência de procedimento de inspeção de equipamentos</p> <p>CR6: Falta de controle em serviços contratados</p> <p>CR7: Falta de controle de registros de operação das caldeiras</p> <p>CR8: Treinamento insuficiente para a realização da função</p> <p>CR9: Baixa percepção do risco de explosão por sobrepressão de vapor na caldeira</p>
	Integridade mecânica	CR10: Falta de investigação para funcionamento anormal das PSVs

Fonte: ANP (2018)

4.3.2 Análise STAMP/CAST

A presente seção fixa-se aos principais achados da análise STAMP/CAST aplicada ao caso, baseada apenas na análise dos relatórios de investigações oficiais da Marinha do Brasil (2017), ANP (2018) e Autoridade Marítima das Bahamas (BAHAMAS MARITIME AUTHORITY, 2020), ou seja, sem participação direta dos autores.

O acidente ocorreu em contexto de explosão de caldeira. Assim, temos os



seguintes dados básicos contidos no Quadro 2:

Quadro 2 – Dados básicos do sistema

Perigo do sistema: Explosão da caldeira

Restrições do sistema:

- A caldeira deve operar em pressão abaixo da pressão máxima de trabalho admissível (PMTA);
- As condições da caldeira devem ser rotineiramente avaliadas através de manutenções adequadas;
- A caldeira deve ser operada por profissionais experientes e qualificados, de acordo com o manual e procedimentos expedidos pelo fabricante.

Sistema analisado:

- **OOG:** contratada pela Petrobras e responsável pela operação da sonda marítima (local do acidente)
- **IMI:** empresa subcontratada da OOG para inspeção da caldeira
- **Petrobras:** contratante da OOG
- **Fabricante:** fabricante da caldeira
- **Inspeção do Trabalho:** responsável por fiscalizar as normas de segurança no trabalho
- **Ministério do Trabalho:** regulamenta e pormenoriza as leis elaboradas pelo Congresso Nacional
- **Congresso Nacional:** responsável por editar leis que garantam a fabricação e operação segura de caldeiras

Fonte: o autor

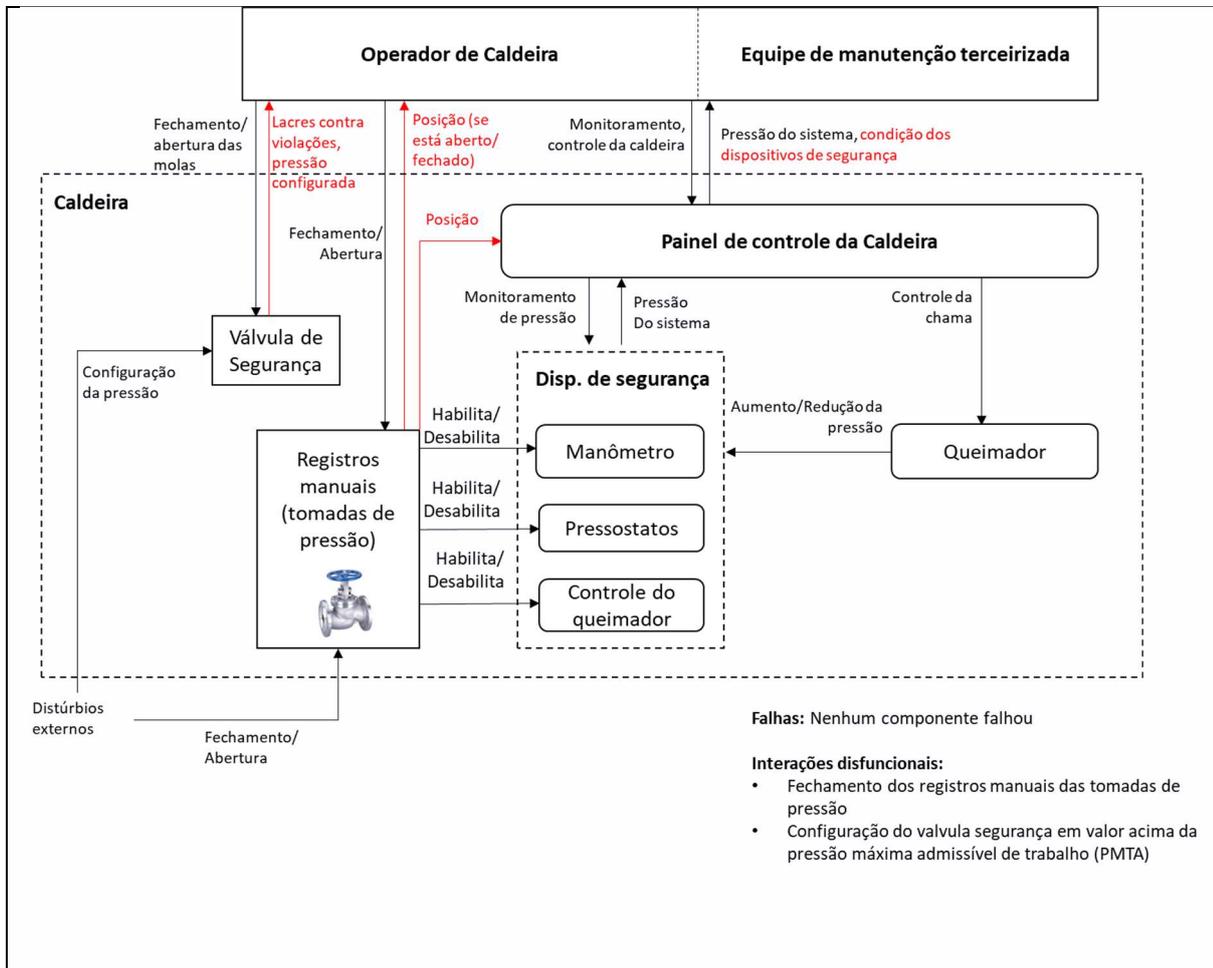
Dentro do primeiro passo da análise CAST, construiu-se a ECS do processo operacional. A partir desta, extraiu-se que diversos dispositivos críticos para a segurança – como a válvula de segurança e os registros manuais de tomada de pressão – podem sofrer interferências externas (distúrbios), sem que os operadores ou equipe de manutenção tenham ciência desse fato (vide, na Figura 21, *feedbacks* ausentes ou insuficientes em



vermelho). Também, observa-se que nenhum componente falhou em termos físicos – todos os dispositivos de segurança continuavam plenamente funcionais, porém desabilitados ou com suas configurações adulteradas. Além disso, a partir da ECS operacional, nota-se que: i) a disponibilidade de acesso e operação das válvulas manuais de tomadas de pressão permite desabilitar dispositivos de segurança críticos sem maiores dificuldades; ii) o desenho dos acionadores das válvulas manuais (acionamento manual por volante) não permitem deduzir, visualmente, se os registros estão abertos ou fechados (tal como ocorre com o acionador manual por alavanca), e; iii) o desenho da válvula de segurança não permite uma estimativa, mesmo que grosseira, da pressão configurada. São apenas alguns exemplos de como a ausência de *feedbacks* (design adequado) da caldeira contribuiu para que essas intervenções em registros manuais das tomadas de pressão e PSV passassem despercebidas pelos operadores – não houve qualquer sinalização aos obreiros da migração do sistema para um estado mais inseguro (LANDI; MONTEDO; LAHOZ, 2022).



Figura 21 –Estrutura hierárquica de controle (processo operacional) utilizada em análise de explosão de caldeira – em vermelho, *feedbacks* ausentes que poderiam auxiliar a atualização do modelo mental dos operadores



Fonte: adaptado de Landi, Montedo e Lahoz (2022)

Seguidamente, a modelagem do ECS do sistema analisou a distribuição de responsabilidades (deveres), autoridades (controles) e prestação de contas (*feedbacks*) pela prevenção do acidente entre todos os elementos da estrutura – dispostos no Quadro 3 e Figura 22. Cuida-se de etapa relevante, na medida em que, quanto mais acima da hierarquia – ou seja mais afastado em tempo e espaço do operacional (interface-homem máquina) – maior a capacidade de um elemento gerar fatores sistêmicos (REASON, 1990b).



Quadro 3 – Resumo dos deveres, contexto das decisões tomadas e contribuições para o acidente

OOG (contratada)	IMI (subcontratada)	IMI (equipe local)	Petrobras (contratante)
<p>Responsabilidades de segurança:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Garantir que os dispositivos de segurança da caldeira estão funcionando adequadamente ▪ Garantir que a contratada detenha capacidade técnica ▪ Compartilhar riscos e dados técnicos da caldeira com a contratada ▪ Supervisionar e avaliar as inspeções realizadas pela contratada ▪ Registrar as intervenções e eventos relevantes envolvendo a caldeira 	<p>Responsabilidades de segurança:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Supervisionar manutenção por meio de profissional legalmente habilitado (engenheiro) ▪ Prover equipamentos adequados para inspeção e testes de caldeira ▪ Prover procedimentos adequados para inspeção da caldeira ▪ Contratar ou utilizar pessoal tecnicamente qualificado 	<p>Responsabilidades de segurança:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Realizar inspeção da caldeira com procedimentos adequados <p>Contexto da decisão:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Equipe sem equipamento adequado para inspeção ▪ Ausência de capacitação para intervenção em caldeiras ▪ Ausência de instruções de trabalho adequadas ▪ Líder da supervisão (engenheiro) prestando assistência remota 	<p>Responsabilidades de segurança:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Estabelecer política de segurança ▪ Garantir o atendimento às normas de segurança pelas contratadas <p>Contexto da decisão:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sonda marítima de propriedade de terceiros ▪ Desconhecimento de outras intervenções na caldeira da contratada, devido à ausência de registro no Livro de Segurança



<p>Contexto da decisão:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Análise de risco insuficiente ▪ Feedbacks insuficientes acerca das condições da caldeira <p>Contribuições para o acidente:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Supervisão insuficiente da subcontratada ▪ Não registro de intervenções na caldeira ▪ Falta de avaliação de risco das válvulas manuais da caldeira ▪ Instruções simplórias de operação da caldeira 	<p>Contexto da decisão:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro sem qualificação em engenharia mecânica <p>Contribuições para o acidente:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausência de supervisão no local das atividades ▪ Não fornecimento à equipe local de equipamentos mínimos para inspeção e teste da caldeira ▪ Expertise insuficiente 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Feedback</i> insuficiente e inadequado das condições da caldeira – desconhecimento do valor configurado na PSV para alívio, desconhecimento do fechamento de registros manuais de válvula de pressão e desconhecimento da submedição do manômetro <p>Contribuições para o acidente:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Calibração da válvula, por meio do manômetro diretamente no corpo de uma caldeira em funcionamento, em vez de calibrar em bancada ▪ Não verificação dos registros 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Menor influência em subcontratadas de contratadas <p>Contribuições para o acidente:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Supervisão insuficiente das contratadas e subcontratadas
---	--	--	---



		manuais de tomada de pressão	
<p>Ministério do Trabalho</p> <p>Responsabilidades de segurança:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Regulamentação de leis que garantam a operação Segura de caldeiras ▪ Aprimorar regulações quando constatadas lacunas que permitiram a ocorrência de acidentes ▪ Propor projetos de leis que melhorem a segurança do trabalho ▪ Providenciar recursos humanos e técnicos à Inspeção do Trabalho 	<p>Inspeção do Trabalho</p> <p>Responsabilidades de segurança:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Garantir a conformidade das organizações com as leis e regulamentos para operação segura de caldeiras ▪ Aplicar penalidade nos casos de não conformidade ▪ Elaborar relatórios de acidente e recomendações para prevenção de futuros sinistros <p>Contexto da decisão:</p>	<p>Fabricante da caldeira</p> <p>Responsabilidades de segurança:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Projetar e fabricar caldeiras seguras, de modo a permitir o monitoramento correto de pressão, temperatura entre outras ▪ Elaborar manuais, procedimentos e informações técnicas para operação Segura e manutenção da caldeira. <p>Contexto da decisão:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Utilização de técnicas de projeto que não identificam, 	<p>Congresso Nacional</p> <p>Responsabilidades de segurança:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Criar leis que garantam a segurança na fabricação e operação de caldeiras ▪ Criar leis que definam penalidades adequadas para aqueles que estiverem em desconformidade <p>Contexto da decisão:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pressão por redução ou



<p>Contexto da decisão:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Restrições orçamentárias para novos concursos ▪ Pressão pelo uso de tecnologia com substituta de recursos humanos ▪ Pressure to make regulatory standards more flexible <p>Contribuições para o acidente:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Corpo de inspetores o trabalho insuficiente ▪ Falta de pessoal com conhecimento específico em engenharia de segurança do trabalho (por ex., ausência de reserva de vagas exclusivas para engenheiros de 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Insuficiência de recursos humanos, equipamentos e veículos ▪ Valorização do atingimento de metas quantitativas de fiscalização, o que pode influenciar a qualidade <p>Contribuições para o acidente:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Falta de incentivos (por ex.: protocolos e centralização/ coordenação da análise com outras regionais) para que investigações de acidente que alcancem elementos externos às empresas (fabricantes, governo etc.) ▪ Insuficiência de ações de prevenção específica em 	<p>de forma suficiente, os riscos envolvidos na operação da caldeira</p> <p>Contribuições para o acidente:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sinalizações (feedbacks) insuficientes das condições da caldeira ▪ Fornecimento de manual de caldeira em língua estrangeira 	<p>flexibilização das leis trabalhistas</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pressão por redução de leis que possam causar custos ou prejudicar a instalação de empresas no país <p>Contribuições para o acidente:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Não atualização, desde a década de 1990, do valor monetário da multa por descumprimento de norma de segurança e saúde no trabalho ▪ Falta de leis que tornem públicos quaisquer investigações e relatórios de acidente de trabalho elaborados por agências governamentais
--	---	--	---



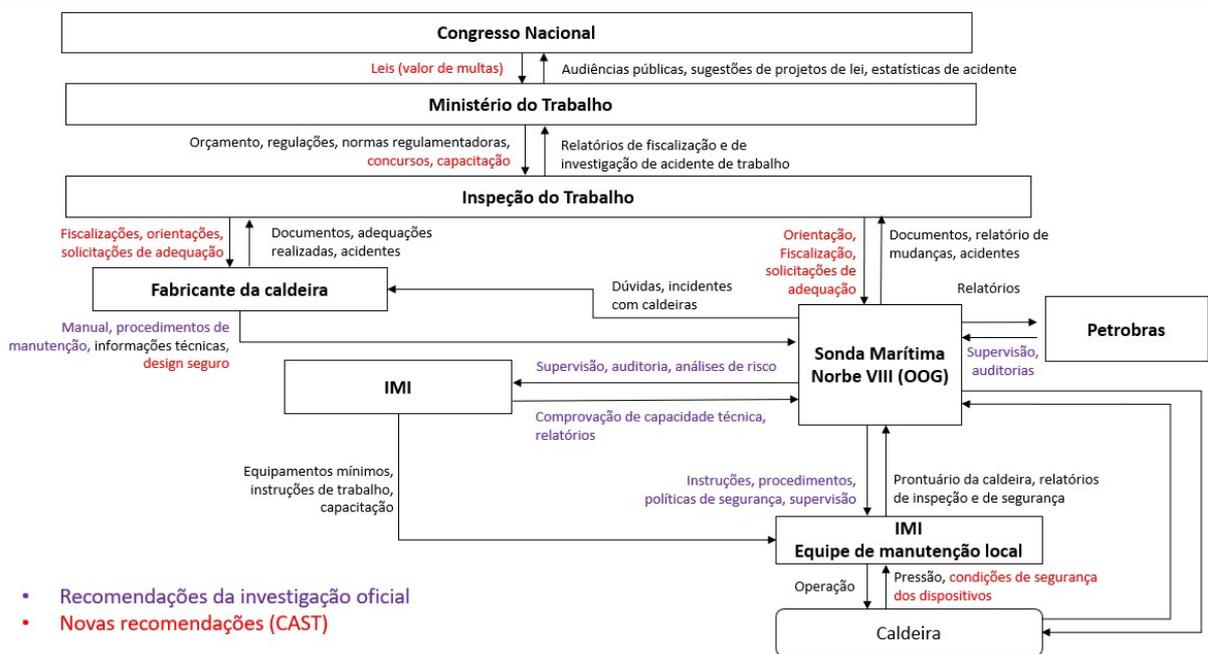
segurança do trabalho)	fabricantes, antes que máquinas irregulares alcancem o mercado		Falta de leis que fomentem o conhecimento público da natureza dos acidentes e que reduzam a culpabilização das vítimas
------------------------	--	--	--

Fonte: Landi, Montedo e Lahoz (2022)



Em relação à modelagem do sistema como um todo, foram encontrados fatores sistêmicos que potencializam ou permitem a existência de fatores de risco não apenas no local do sinistro, mas em qualquer outro estabelecimento. Não atualização inflacionária, desde a década de 1990, do valor da multa por descumprimento de norma de segurança e saúde no trabalho, e ausência de concursos regulares para reposição de vacâncias de aposentadorias são exemplos de fatores que afetam não apenas as organizações envolvidas no acidente, mas todas as empresas nacionais.

Figura 22 – Estrutura hierárquica de controle do sistema – em vermelho, controles/feedbacks ausentes ou insuficientes



Fonte: adaptado de Landi, Montedo e Lahoz (2022)

Assim, com base na metodologia STAMP, foram levantadas as seguintes recomendações adicionais:

- (1) **Fabricante: alterar o método de design de caldeiras.** A facilidade com que diversos dispositivos de segurança foram desativados sugere que o método de design da caldeira do fabricante não é adequado para detectar interações indesejáveis em seus elementos. Uma alteração desse método poderá evitar não apenas acidentes semelhantes, mas também outros não vislumbrados.

- (2) **Fabricante: remover os registros manuais da tomada de pressão.** Uma vez que: (i) a caldeira era utilizada esporadicamente; (ii) a OOG contava com uma caldeira sobressalente, e; (iii) há risco em operar uma caldeira com seus dispositivos anulados; não há a necessidade de se manter registros manuais na tomada de pressão.
- (3) **Fabricante: incluir sensores de fechamento dos registros manuais.** Alternativamente à remoção dos registros, podem ser incluídos sensores de fechamento destas que intertravam a caldeira em caso de fechamento das tomadas de pressão.
- (4) **Fabricante: Alterar o design de forma a melhorar a sinalização dos registros manuais.** Uma alteração do design da dos registros manuais permitiria evidenciar de forma clara e direta o seu fechamento.
- (5) **Fabricante: Alterar design das PSVs para permitir uma visualização aproximada da pressão configurada.** Os operadores da caldeira não souberam identificar que as molas da PSVs estavam completamente comprimidas e configuradas em valores bem superiores à PMTA. Uma alteração de design das peças permitiria a visualização da pressão, mesmo que aproximada, de abertura das PSVs.
- (6) **Fabricante: Acrescentar um segundo manômetro.** Um segundo manômetro permite detecção precoce de falha em qualquer um dos dispositivos ou de necessidade de calibração.
- (7) **OOG: Dificultar acesso às válvulas das tomadas de pressão.** Instalar barreiras físicas pode reduzir a probabilidade de intervenções indevidas nas válvulas das tomadas de pressão.
- (8) **Petrobrás: Incluir as subcontratadas (“quarteirizadas”) em suas auditorias.** As auditorias não devem ser limitadas às contratadas diretamente, mas também às subcontratadas.
- (9) **Inspeção do Trabalho: adequar expressões da lista de fatores causais do Sistema Federal de Inspeção do Trabalho (SFIT):** Termos que sugerem culpa ou julgamento devem ser alterados, especialmente aqueles que utilizam o termo “falha” em situações fora do contexto de componentes físicos, pois podem desencorajar o aprofundamento das análises.



- (10) **Ministério do Trabalho: recompor o quadro de fiscais em quantitativo compatível com a população economicamente ativa.** À época, o quadro de fiscais estava muito aquém do requerido para uma fiscalização que permita tanto a conformidade ativa (por meio de fiscalizações) quanto passiva (regularização voluntária em decorrência da percepção da presença fiscal).
- (11) **Ministério do trabalho: selecionar pessoal de perfil mais técnico.** Devem ser realizados estudos sobre qual setor é mais premente a necessidade de conhecimentos técnicos, a partir de critérios objetivos (por exemplo, pela incidência de acidentes graves em determinado setor econômico ou com determinados tipos de equipamentos). O ingresso de perfis técnicos nos quadros (por exemplo, engenheiros, médicos, entre outros, com especialização em engenharia de segurança e saúde no trabalho ou medicina do trabalho) poderia viabilizar análises mais profundas de relatórios e laudos emitidos por empresas.
- (12) **Congresso Nacional: atualização dos valores de multas trabalhistas.** Os valores atuais de multas trabalhistas representam, atualmente, apenas uma fração do valor real de outrora. Se considerada a inflação, os valores atuais deveriam ser multiplicados mais de cinco vezes.
- (13) **Congresso Nacional: Divulgação de relatórios de acidente.** A Inspeção do Trabalho deveria ser obrigada a divulgar relatórios de investigação detalhados com o fim de disseminar as lições aprendidas com os acidentes.

5. CONCLUSÃO

O estudo revisou as principais abordagens tradicionais de análise de acidentes utilizadas no meio acadêmico e prático e elencou as limitações existentes naquelas que utilizam eventos encadeados para representar acidentes. Uma nova abordagem – STAMP/CAST – é apresentada.

Como demonstrado nessa nova abordagem, onde o órgão governamental de investigação detectou apenas descumprimentos de procedimentos administrativos e



deficiências em documentos, treinamentos e supervisão (ANP, 2018), a análise STAMP/CAST encontrou indícios de deficiências graves no design da caldeira

Embora todas as constatações e recomendações do órgão governamental tenham seus méritos, elas se limitaram a aspectos comportamentais e documentais. Em outras palavras, eles compreendem apenas barreiras simbólicas (por exemplo, instruções, procedimentos) e incorpóreas (por exemplo, treinamento), classificadas como de baixa eficiência, não recomendadas para tarefas críticas de segurança, difíceis de avaliar sua eficácia e altamente dependentes de humanos durante operações, em contraposição a barreiras físicas e funcionais (HOLLNAGEL, 2008).

Ademais, foi possível elaborar recomendações em controles governamentais – como publicidade dos relatórios de análise de acidente elaborados pelo MTE, melhorias na forma de contratação de agentes de fiscalização, atualização de valores monetários de multas, entre outros – algo sequer cogitado por investigações oficiais (ANP, 2018; BRASIL, 2017; LANDI; MONTEDO; LAHOZ, 2022; MARINHA DO BRASIL, 2017).

Portanto, faz-se necessário que as abordagens em investigações de acidente de acidente de trabalho, especialmente as governamentais, evoluam para a lidar adequadamente com aspectos técnicos, sociais, gerenciais e políticos na gênese de infortúnios laborais. Propõe-se a adoção do modelo STAMP/CAST como forma de superar as limitações das ferramentas tradicionais, baseadas em eventos encadeados.

Em razão de haver limitações na generalização de estudos de caso únicos, sugere-se que, futuramente, novos estudos de infortúnios laborais sejam efetuados em setores econômicos diversos.

DISCLAIMER

As opiniões expressas no artigo são pessoais dos autores e não representam posição oficial de qualquer órgão ou agência governamental.



REFERÊNCIAS

AHN, J.; GUARNIERI, F.; FURUTA, K. **Resilience: A New Paradigm of Nuclear Safety**. Cham: Springer International Publishing, 2017.

ALE, B. J. M. *et al.* Quantifying occupational risk: The development of an occupational risk model. **Safety Science**, [s. l.], v. 46, n. 2, p. 176–185, 2008.

ALMEIDA, I. M.; VILELA, R. A. G. **Modelo de análise e prevenção de acidente de trabalho - MAPA**. 1. ed. Piracicaba, Brazil: CEREST, 2010. *E-book*. Disponível em: <https://renastonline.ensp.fiocruz.br/sites/default/files/arquivos/recursos/MAPA-acidente-de-trabalho.pdf>.

ALTABBAKH, H. *et al.* STAMP - Holistic system safety approach or just another risk model?. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, Missouri University of Science and Technology, Engineering Management and Systems Engineering, 223 Engineering Management, 600 W. 14th St., Rolla, MO 65409-0370, United States, v. 32, p. 109–119, 2014.

ALVARENGA, M. A. B.; FRUTUOSO E MELO, P. F.; FONSECA, R. A. A critical review of methods and models for evaluating organizational factors in Human Reliability Analysis. **Progress in Nuclear Energy**, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLAND, v. 75, p. 25–41, 2014.

ANP. **Relatório de Investigação de Incidente - Sonda Marítima Norbe VIII (NS-32)**. Rio de Janeiro/RJ, Brasil: Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2018.

AYYUB, B. M. **Risk Analysis in Engineering and Economics**. 2. ed. Nova Iorque: Chapman and Hall/CRC, 2014.

BAHAMAS MARITIME AUTHORITY. **Report of the marine safety investigation into a boiler explosion leading to three fatalities on a drill ship on 09 June 2017**. London, United Kingdom: Bahamas Maritime Authority, 2020. Disponível em: <https://www.bahamasmaritime.com/wp-content/uploads/2020/10/BMA-Investigation-Report-Boiler-explosion-resulting-in-three-fatalities-onboard-the-Norbe-VIII.pdf>. Acesso em: 3 nov. 2021.

BRASIL. **Sistema Federal de Inspeção do Trabalho**. Brasília: Ministério do Trabalho e Previdência, 2022.

BRASIL. **Sistema Federal de Inspeção do Trabalho. Relatório de Acidente de Trabalho - RI n. 30124591-6**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2017.

CANHAM, A. *et al.* Integrating systemic accident analysis into patient safety incident investigation practices. **Applied Ergonomics**, [s. l.], v. 72, p. 1–9, 2018.



DE LINHARES, T. Q.; MAIA, Y. L.; FERREIRA FRUTUOSO E MELO, P. F. The phased application of STAMP, FRAM and RAG as a strategy to improve complex sociotechnical system safety. **Progress in Nuclear Energy**, Graduate Program of Nuclear Engineering, COPPE, Federal University of Rio de Janeiro, P.O. Box 68509, Rio de Janeiro, RJ 21941-972, Brazil, v. 131, 2021.

FU, G. *et al.* The development history of accident causation models in the past 100 years: 24Model, a more modern accident causation model. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 134, p. 47–82, 2020.

GONÇALVES FILHO, A. P.; QUEIROZ, P. S. Abordagem sistêmica para investigar trágico acidente marítimo no Brasil. **Laborare**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 39–59, 2019.

GONCALVES FILHO, A. P.; WATERSON, P.; JUN, G. T. Improving accident analysis in construction – Development of a contributing factor classification framework and evaluation of its validity and reliability. **Safety Science**, [s. l.], v. 140, 2021.

HICKEY, J.; EIKEMA HOMMES, Q. Van. Effectiveness of accident models: System theoretic model vs. the Swiss Cheese model: A case study of a US Coast Guard aviation mishap. **International Journal of Risk Assessment and Management**, Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Avenue, Cambridge, MA 02139-4307, United States, v. 17, n. 1, p. 46–68, 2013.

HOLLNAGEL, E. **Barriers and Accident Prevention**. 1. ed. Hampshire: Ashgate Publishing Limited, 2016.

HOLLNAGEL, E. **FRAM - the Functional Resonance Analysis Method: modelling complex socio-technical systems**. [S. l.]: Ashgate Publishing Limited, 2012.

HOLLNAGEL, E. Risk + barriers = safety?. **Safety Science**, [s. l.], v. 46, n. 2, p. 221–229, 2008.

HOLLNAGEL, E.; WOODS, D. D.; LEVESON, N. **Resilience Engineering: concepts and precepts**. Hampshire: Ashgate Publishing Limited, 2006. *E-book*. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781317065296>.

HULME, A. *et al.* What do applications of systems thinking accident analysis methods tell us about accident causation? A systematic review of applications between 1990 and 2018. **Safety Science**, [s. l.], v. 117, n. March, p. 164–183, 2019.

IGENE, O. O.; JOHNSON, C. To Computerised Provider Order Entry system: A comparison of ECF, HFACS, STAMP and AcciMap approaches. **Health Informatics Journal**, University of Glasgow, United Kingdom, v. 26, n. 2, p. 1017–1042, 2020.
IIDA, I. Novas aborgagens em segurança do trabalho. **Produção**, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 63–73, 1991.



JACINTO, C.; SILVA, C. A semi-quantitative assessment of occupational risks using bow-tie representation. **Safety Science**, [s. l.], v. 48, n. 8, p. 973–979, 2010.

KATSAKIORI, P.; SAKELLAROPOULOS, G.; MANATAKIS, E. Towards an evaluation of accident investigation methods in terms of their alignment with accident causation models. **Safety Science**, [s. l.], v. 47, n. 7, p. 1007–1015, 2009.

KAYA, G. K. A system safety approach to assessing risks in the sepsis treatment process. **Applied Ergonomics**, Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Istanbul Medeniyet University, Uskudar, Istanbul, Turkey, v. 94, 2021.

KAZARAS, K.; KIRYTOPOULOS, K.; RENTIZELAS, A. Introducing the STAMP method in road tunnel safety assessment. **Safety Science**, RADARWEG 29, 1043 NX AMSTERDAM, NETHERLANDS, v. 50, n. 9, p. 1806–1817, 2012.

LANDI, R. G.; MONTEDO, U. B.; LAHOZ, C. H. N. Using systems theory for additional risk detection in boiler explosions in Brazil. **Safety Science**, [s. l.], v. 152, p. 105761, 2022. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925753522001011>.

LAROUZEE, J.; LE COZE, J. C. Good and bad reasons: The Swiss cheese model and its critics. **Safety Science**, [s. l.], v. 126, n. February, p. 104660, 2020.

LEVESON, N. Applying systems thinking to analyze and learn from events. **Safety Science**, [s. l.], v. 49, n. 1, p. 55–64, 2011.

LEVESON, N. **CAST HANDBOOK: How to Learn More from Incidents and Accidents**. [S. l.: s. n.], 2019.

LEVESON, N. **Engineering a safer world : systems thinking applied to safety**. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2012.

MANUELE, F. A. Reviewing Heinrich: Dislodging Two Myths from the Practice of Safety. *Em: ON THE PRACTICE OF SAFETY*. 4. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013. p. 234–256.

MARINHA DO BRASIL. **Explosion with victims on the “Norbe VIII” Plataform**. Macaé/RJ, Brasil: Marinha do Brasil, 2017.

MOGLES, N.; PADGET, J.; BOSSE, T. Systemic approaches to incident analysis in aviation: Comparison of STAMP, agent-based modelling and institutions. **Safety Science**, University of Bath, Department of Computer Science, Bath, United Kingdom, v. 108, p. 59–71, 2018.

NORMAN, D. A. **O design do dia a dia**. 1. ed. Rio de Janeiro/RJ: Anfiteatro, 2018.

PANDAGGIS, L. R. **Uma leitura da árvore de causas no atendimento de demanda do Poder Judiciário: um fluxograma de antecedentes**. 2003. 151 f. - Dissertação (mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

PATRIARCA, R. *et al.* Framing the FRAM: A literature review on the functional resonance analysis method. **Safety Science**, [s. l.], v. 129, n. April, p. 104827, 2020.

PRIORI, F. R.; SAURIN, T. A. Aplicação do fram para solução de problemas em sistemas sócio-técnicos complexos: estudo de caso em uma unidade hospitalar. **Revista Produção Online**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 102–128, 2019.

QIAO, W.; LI, X.; LIU, Q. Systemic approaches to incident analysis in coal mines: Comparison of the STAMP, FRAM and “2–4” models. **Resources Policy**, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, OXON, ENGLAND, v. 63, 2019.

RAMAN, J. *et al.* When a checklist is not enough: How to improve them and what else is needed. **Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery**, Division of Cardiothoracic Surgery, Oregon Health & Science University, Portland, Ore, United States, v. 152, n. 2, p. 585–592, 2016.

RASMUSSEN, J. Risk management in a dynamic society: a modelling problem. **Safety Science**, [s. l.], v. 27, n. 2–3, p. 183–213, 1997.

RASMUSSEN, J.; SVEDUNG, I. **Proactive Risk Management in a Dynamic Society**. 1. ed. Karlstad, Sweden: Swedish Rescue Services Agency, 2000.

REASON, J. Human error: Models and management. **Western Journal of Medicine**, [s. l.], v. 172, n. 6, p. 393–396, 2000.

REASON, J. **Organizational Accidents Revisited**. [S. l.]: CRC Press, 2016.

REASON, J. The contribution of latent human failures to the breakdown of complex systems. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences**, [s. l.], v. 327, n. 1241, p. 475–484, 1990a.

REASON, J. The contribution of latent human failures to the breakdown of complex systems. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences**, [s. l.], v. 327, n. 1241, p. 475–484, 1990b. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781351563475/chapters/10.4324/9781315092898-2>.

ROCHA, R.; VILELA, R. A. G. Por uma cultura de segurança nas organizações. *Em*: BRAATZ, D.; ROCHA, R.; GEMMA, S. (org.). **Engenharia do trabalho: saúde, segurança, ergonomia e projeto**. Santana de Parnaíba, SP: Ex Libris Comunicação, 2021. p. 293–317. *E-book*. Disponível em: <http://engenhariadotrabalho.com.br/>.

SALMON, P. M.; CORNELISSEN, M.; TROTTER, M. J. Systems-based accident analysis methods: A comparison of Accimap, HFACS, and STAMP. **Safety Science**, Human Factors Group, Monash Injury Research Institute, Monash University, Clayton Campus, VIC 3800, Australia, v. 50, n. 4, p. 1158–1170, 2012.

SAVIĆ, D. Digital Water Developments and Lessons Learned from Automation in the Car and Aircraft Industries. **Engineering**, [s. l.], v. 9, p. 35–41, 2022.

SILVA, A. J. N. da *et al.* Acidentes de trabalho e os religadores automáticos no setor elétrico: para além das causas imediatas. **Cadernos de Saúde Pública**, [s. l.], v. 34, n. 5, 2018.

STRINGFELLOW, M. **Accident analysis and hazard analysis for human and organizational factors**. 2010. 1–283 f. - Tese de Doutorado. Aeronautics and Astronautics. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 2010.

UNDERWOOD, P.; WATERSON, P. A critical review of the STAMP, FRAM and Accimap systemic accident analysis models. *Em*: STANTON, N. A. (org.). **Advances in Human Aspects of Road and Rail Transportation**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. p. 385–394.

WIEGMANN, D.A. AND SHAPPELL, S. A. **A human error approach to aviation accident analysis: the human factor analysis and classification system**. [S. l.]: Ashgate Publishing Limited, 2003.

YOUSEFI, A. *et al.* Systemic accident analysis models: A comparison study between AcciMap, FRAM, and STAMP. **Process Safety Progress**, 111 RIVER ST, HOBOKEN 07030-5774, NJ USA, v. 38, n. 2, 2019.

ZHANG, Y.; JING, L.; SUN, C. Systems-Based Analysis of China-Tianjin Port Fire and Explosion: A Comparison of HFACS, AcciMap, and STAMP. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, School of Management, Qufu Normal University, Rizhao, 276826, China, v. 18, n. 6, p. 1386–1400, 2018.

