

Pós-Graduação

Segurança de Processos



VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO COMPORTAMENTO HUMANO NAS CAUSAS DE UM ACIDENTE DE SEGURANÇA DE PROCESSO UTILIZANDO O MÉTODO FRAM (FUNCTIONAL RESONANCE ANALYSIS METHOD)

Alexandre de O. Coelho, Eugênio P. C da Silva, Feliz W. C. Dias, Luciene C. C. Germano, Lys de O. Medeiros,

RESUMO

No que se refere a análise e investigação de um acidente, o relatório 621 da IOGP (2018), menciona que o importante a se considerar é que, quando uma investigação descobre um erro humano ou que lapsos contribuíram para a cadeia de eventos, a investigação não deve terminar. A equipe de investigação deve continuar procurando as condições e sistemas que os tornaram suscetíveis de ocorrer. Com base nessa premissa, este trabalho tem o objetivo de reanalisar, utilizando o método FRAM, um acidente por vazamento de óleo combustível devido ao transbordamento em um tanque *Buffer*. Este acidente já havia sido investigado através da ferramenta Árvore de Falhas e teve como resultado a culpabilização dos operadores. Através da utilização do método FRAM ficou claro a grande influência dos fatores humanos do desempenho na ocorrência do acidente e foi possível identificar também que, muitos desses fatores sequer foram considerados na investigação original. Dessa forma, a aplicação do método FRAM como complemento na análise deste acidente possibilitou uma análise mais coerente, permitindo reconhecer fragilidades organizacionais contribuintes para o acidente, além de permitir o entendimento das interações entre os eventos.

Palavras-chave: Fatores Humanos, FRAM, Árvores de Falhas, Fatores Organizacionais.

ABSTRACT

In the context of accident analysis and investigation, the IOGP Report 621 (2018) emphasizes the importance that, when an investigation uncovers human errors or lapses that contributed to the chain of events, the investigation should not conclude. Instead, the investigative team should persist in seeking the conditions and systems that made them susceptible to occur. Building on this premise, this study aims to reanalyze an accident involving a fuel oil leakage due to overflow in a Buffer tank, utilizing the Functional Resonance Analysis Method (FRAM). This accident had previously been investigated using the Fault Tree Analysis tool, resulting in the operators being held responsible. Through the application of the FRAM method, it became evident that the influencing human factors significantly impacted the occurrence of the accident. Furthermore, it was identified that many of these factors had not even been considered in the original investigation. Consequently, the implementation of the FRAM model in analyzing this accident facilitated a more coherent examination, allowing the recognition of organizational vulnerabilities that contributed to the incident. Moreover, it enabled an understanding of the interactions among the events. In summary, this study demonstrates how the FRAM approach facilitated a comprehensive investigation, highlighting crucial aspects that were overlooked in the previous analysis. As a result, it moved beyond the simplistic attribution of blame to operators and pointed out systemic and organizational failures that played a substantial role in the incident.

Keywords: Human Factors, FRAM, Fault Trees, Organizational Factors.

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma das constatações mais comuns após um processo de análise e investigação de ocorrências é a de que o comportamento humano é uma das principais causas dos acidentes, o que faz com que a maioria das organizações voltem seus olhos aos indivíduos e invistam em treinamentos e abordagens comportamentais, por exemplo.

Hollnagel (2012) afirma que investigações de acidentes são focadas em encontrar o que saiu errado, o que pode ser válido para sistemas técnicos. Contudo, para o autor, essa é uma visão limitada quando Sistemas Sociotécnicos Complexos (SSC) são o foco. Isso ocorre pois é impossível prever com precisão o desempenho de um SSC, considerando que o trabalho real não é completamente correspondente ao trabalho como imaginado (HOLLNAGEL et al., 2004).

É sabido que em acidentes de segurança de processo a falha humana também pode existir, mas a grande questão é o que fazer a partir dessa falha. O que existe além da falha humana? Existe uma resiliência natural do ser humano? Uma capacidade nossa de se adaptar às situações?

Há muito mais do que apontar a culpa do trabalhador em um acidente. Mais do que culpar ou punir um trabalhador quando ocorre um acidente, a gestão da empresa deve buscar as causas primordiais na situação de trabalho que esses trabalhadores estão inseridos. Para Reason (1994), os erros humanos são falhas nas ações que foram planejadas, sem levar em conta a influência de eventos imprevistos.

Se um comportamento foi causal ou contribuinte para o incidente, a análise de Fatores Humanos pode ajudar o investigador a entender o que afetou o desempenho humano e ajudar a desenvolver recomendações úteis para reduzir esse risco no futuro. Segundo o relatório 621 da IOGP (2018), Fatores Humanos são simplesmente condições que podem influenciar o que as pessoas fazem, podendo incluir os chamados “Fatores Contribuintes para o Desempenho”. Tais fatores são relacionados com o trabalho que as pessoas realizam, fatores do indivíduo e os fatores organizacionais.

Sabendo-se que Fatores Humanos não é apenas focar no ser humano, mas sim a partir do ser humano e entender quais fatores influenciam o seu desempenho, é necessário também entender que existe uma complexidade de fatores envolvidos, os chamados Sistemas Sociotécnicos Complexos (SSC).

Ao se associar o tema Fatores Humanos à análise e investigação de acidentes, percebe-se que deixa de ser razoável que neste processo sejam apontados apenas erros e culpados. Fica evidente a necessidade de se aprofundar nos diversos fatores que levaram a ocorrência daquele evento, tomando como base as dimensões tecnológicas, ambientais, organizacionais, individuais e suas interações. Com base nessa premissa, este trabalho será destinado a reanalisar um acidente de segurança de processo, dessa vez utilizando uma metodologia complementar a utilizada pela equipe de investigação inicial. Para este trabalho será utilizada o método FRAM, que busca fazer uma modelagem, analisando a segurança de processo a partir da integração da planta com os operadores, por exemplo, e todos os outros sistemas que interagem, com o objetivo de descobrir toda a resposta dinâmica que o ser humano pode ter nas plantas de processo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Partindo do princípio que a metodologia FRAM considera como eventos inesperados e esperados os resultados naturais das combinações variáveis dos complexos sistemas sociotécnicos que compõem um local de trabalho (Saldanha et al., 2020), este trabalho objetiva analisar um relatório de investigação de um acidente de segurança de processo, aplicando o Método FRAM, avaliando o desempenho do método nesse contexto e buscando analisar os fatores humanos envolvidos no acidente. A investigação original foi feita usando como metodologia a Árvore de Falhas e as questões de fatores humanos não foram aprofundadas.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dentre os objetivos específicos desta pesquisa figuram:

- Verificar se o método FRAM pode identificar os fatores humanos envolvidos no acidente;
- Verificar se a aplicação das advertências nos operadores envolvidos no acidente foi coerente com as práticas de fatores humanos;
- Compreender o que realmente causou ou contribuiu para o acidente, analisando fatores organizacionais, ambientais, tecnológicos, individuais e a integração entre eles.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 - FATORES HUMANOS

O campo de estudos dos Fatores Humanos - FH, segundo a *Federal Aviation Association* (FAA, 2002), tem suas raízes na aviação e em dados e estudos de manutenção bélica. O embrião para a estruturação desse conhecimento foi a 2^a Guerra Mundial, em decorrência dos inúmeros acidentes ocorridos e a necessidade de adaptar veículos militares, aviões e demais equipamentos bélicos, às características físicas e psicofisiológicas dos soldados (VIDAL, 1999). Ainda segundo o autor, o primeiro trabalho identificado na área de projeto de equipamentos e desempenho humano foi realizado durante o período da Guerra.

Nos EUA, segundo a FAA (2002), o campo de estudos sobre os FH foi reconhecido em 1957, durante a fundação e o primeiro encontro da *Human Factors Society*. Já na Europa, um campo profissional paralelo, conhecido como Ergonomia, já vinha se desenvolvendo havia ao menos uma década. Na Inglaterra, a *Ergonomics Research Society*, atualmente conhecida como *The Ergonomics Society*, foi criada em 1947. Dentro desse movimento nasceu a corrente da Ergonomia denominada de Engenharia de FH (*Human Factors Engineering – HFE*) (VIDAL, 1999).

Os conceitos de Fatores Humanos - FH são amplos e há várias definições formais diferentes usadas para descrever esse escopo.

Uma definição adotada por diversos especialistas e pesquisadores, bem como empresas, é que Fatores Humanos são todos aqueles fatores que influenciam o desempenho dos seres humanos, dos trabalhadores, nas suas atividades laborais; tais

fatores são de ordem organizacional, individual, tecnológica e ambiental, que interagem entre si, conforme demonstrado na Figura 1 (FRANÇA, 2020).

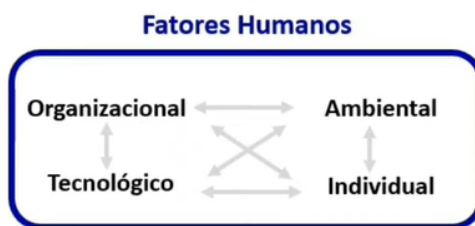


Figura 1 – Representação Gráfica de Fatores Humanos. Fonte: FRANÇA, 2020.

Erik Hollnagel (2012), descreve que, com relação a Fatores Humanos deve-se começar tendo em mente que existe uma grande diferença entre o trabalho como imaginado e o trabalho como realizado.

O HSE do Reino Unido usa a seguinte definição de Fatores Humanos, retirada de sua publicação: Reduzindo erros e influenciando o comportamento (HSG48):

“Fatores humanos referem-se a fatores ambientais, organizacionais e de trabalho, e características humanas e individuais, que influenciam o comportamento no trabalho de uma forma que pode afetar a saúde e a segurança. Uma maneira simples de ver os Fatores Humanos é pensar em três aspectos: o trabalho, o indivíduo e a organização e como eles impactam a saúde e o comportamento relacionado à segurança das pessoas.”

França (2020), ressalta que Fatores Humanos não é a mera análise do comportamento humano, especialmente a análise dos seus erros cometidos no trabalho, e não se resume exclusivamente às características individuais dos trabalhadores. O autor descreve que, na verdade, Fatores Humanos envolve uma análise, uma abordagem sistêmica e multidisciplinar, onde o foco é a partir do trabalhador, e não no trabalhador, compreendendo sistematicamente como o seu desempenho e interações contribuem para a execução do trabalho como é executado de fato.

Ao citar o HSG48 – Publicação do HSE, e França (2020), ambos trazendo a importância de se aprofundar nas análises que vão além do erro humano, é importante ressaltar a classificação dos erros humanos, que segundo Reason (1994), pode ser detalhada como descrito a seguir e representado na Figura 2.

- Descuido ou deslize: realizar a ação correta no item errado. Como exemplo abrir a válvula A ao invés da válvula B. Descuidos se relacionam com ações observáveis e estão associados a falhas na percepção ou na atenção;
- Lapso: deixar de realizar uma ação no tempo certo. Os lapsos se relacionam com falhas de memória;
- Erro ou Engano: realizar a ação errada;
- Violação: interpretar uma informação de maneira incorreta, deliberadamente.

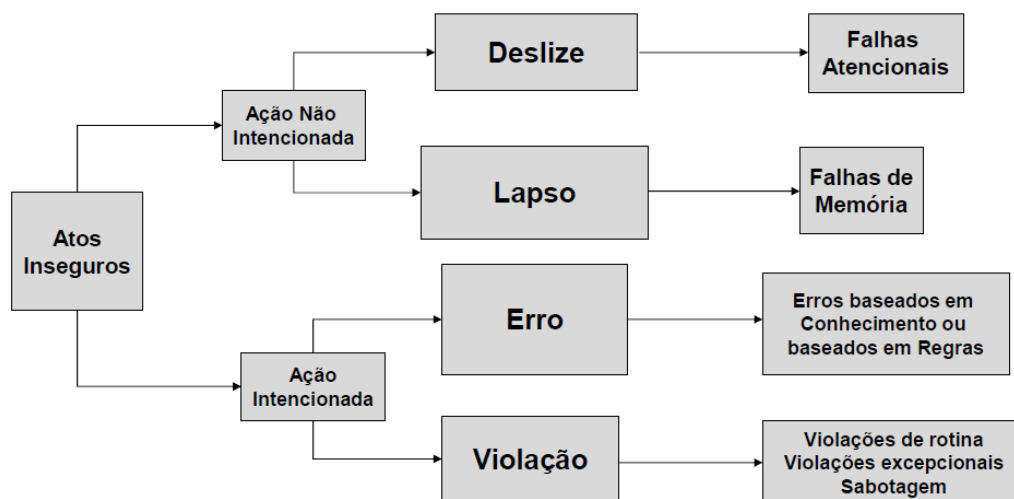


Figura 2 – Classificação de erros humanos. Fonte: Reason, 1994.

2.2 – O MÉTODO FRAM

Ribeiro (2012) menciona em seu trabalho que nos últimos anos a confiabilidade de componentes de hardware utilizados em sistemas tecnológicos melhorou significativamente, principalmente, naqueles sistemas que requerem alto padrão de segurança. Como consequência, a importância relativa das falhas associadas aos fatores humanos e organizacionais têm aumentado significativamente o que reforça a necessidade de investigação de novas metodologias que permitam estimar as probabilidades de maneira mais realista.

Casagrande (2017) ressalta que já é reconhecido que diversos métodos vêm sendo adotados para estudar sistemas sociotécnicos, como por exemplo: a Modelagem de Sistemas Dinâmicos (*Dynamic Systems Modelling* - COWING, PATÉ-CORNELL, GLYNN, 2004), a Análise Cognitiva do Trabalho (*Cognitive Work Analysis* – BISANTZ, BURNS, 2008) e o Método de Análise de Ressonância Funcional (*Functional Resonance Analysis Method* - HOLLNAGEL, 2012).

O Método de Análise por Ressonância Funcional, conhecido como método FRAM, é um exemplo de um método com base na visão sistêmica. Na análise, as funções essenciais do sistema são identificadas e o potencial de variabilidade é caracterizada. (HOLLNAGEL, 2004). Em complemento ao uso de modelos como árvores de eventos e árvores de falhas (arvore de causas) para muitos tipos de sistemas sociotécnicos leva a enriquecer os resultados das investigação dos acidentes, pois quanto as causas relativas a erro humano os fatores humanos a serem contemplados na analise não são lineares.

O FRAM originou-se da teoria da engenharia de resiliência e busca realizar uma modelagem conceitual da variabilidade das diferentes funções de um mesmo sistema. Sua abordagem é qualitativa e busca caracterizar cada função de um sistema a partir de inputs, outputs, recursos necessários, tempo disponível, mecanismos de controle e condições de desempenho de cada uma das principais atividades ou funções do sistema estudado. (STEEN; AVEN, 2011).

O método FRAM foi criado por Erik Hollnagel, um psicólogo dinamarquês, especialista nas áreas de engenharia de resiliência, análise da confiabilidade humana, engenharia de sistemas cognitivos e sistemas homem-máquina inteligentes que há muito, contribui para a área da segurança. Como pesquisador, fez uma importante contribuição na área de confiabilidade humana, criando a metodologia CREAM (*Cognitive Reliability and Error Analysis Method*). No entanto percebeu que, com a evolução dos ambientes de trabalho, tornando-se, muitas vezes, verdadeiros sistemas sociotécnicos complexos, seria necessária uma ferramenta mais completa, que não estudasse apenas o indivíduo. Desta forma Hollnagel criou, no início da segunda década dos anos 2000, o FRAM.

O FRAM é uma metodologia capaz de entender todas essas interações e o funcionamento dos sistemas sociotécnicos complexos. É uma metodologia que busca demonstrar com base em 4 princípios como funciona um sistema, quais sejam, o princípio

da equivalência de falhas e sucessos, o princípio dos ajustes aproximados, o princípio da emergência das situações e princípio da ressonância. O FRAM consegue demonstrar como os sistemas realmente funcionam e como a variabilidade se propaga entre as suas funções, visando a desenvolver sistemas mais resilientes. França (2021) descreve que quando algo acontece no sistema há uma ressonância, onde uma ação reverbera por outros elementos e muda os estados e situações.

De acordo com Hollnagel (2012), o FRAM é baseado em quatro princípios:

1. Princípio da equivalência (de sucesso e falhas): a suposição de que diferentes tipos de consequências não necessitam de diferentes tipos de causas, mas a mesma explicação pode ser usada em muitos, se não todos os casos;
2. Princípio de ajustes aproximados: a suposição de que as pessoas continuamente ajustam o que elas fazem para que as ações combinem com as condições;
3. Princípio da emergência: por terem uma causa específica e identificável, nem todos os resultados podem ser explicados;
4. Princípio da ressonância: nos casos em que não é possível, ou razoável, basear explicações no princípio da causa-efeito, a ressonância funcional pode ser usada para descrever iterações não lineares e resultados.

Hollnagel (2012) ainda define a ressonância funcional como um resultado detectável que emerge de interações não intencionais da variabilidade normal de sinais múltiplos. A ressonância funcional fornece um meio de entender resultados que são não causais (emergentes) e não lineares (desproporcionais), de forma que torne a previsão e o controle possíveis.

França e Hollnagel (2019) descrevem que, para um profissional que nunca viu a representação gráfica do método FRAM, esta metodologia pode parecer relativamente complexo, o que não é. Na verdade, a análise promovida por esta metodologia não é um processo algorítmico, mas sim o desenvolvimento gradual de um entendimento mútuo entre uma equipe de especialistas trabalhando juntos. É uma espécie de discussão complexa sobre as relações de sistemas sociotécnicos complexos, mas feitas de forma simples. Os autores descrevem a ferramenta da seguinte forma:

“A representação gráfica de uma função é um hexágono, onde existe, basicamente, uma saída e cinco entradas para cada função potencial. Cada vértice desse hexágono é, na verdade, a determinação de um dos seis aspectos da função da metodologia FRAM: Tempo, Controle, Saída, Recurso, Pré-condição e Entrada. É importante observar que as letras maiúsculas, mendigando cada aspecto observado, marca sua diferença de uma entrada ou saída ordinária de um fluxograma simples; são os aspectos que formam o método FRAM e determinados por sua metodologia como as conexões entre as funções.”

A seguir, na Figura 3, a representação da função de um hexágono do FRAM:

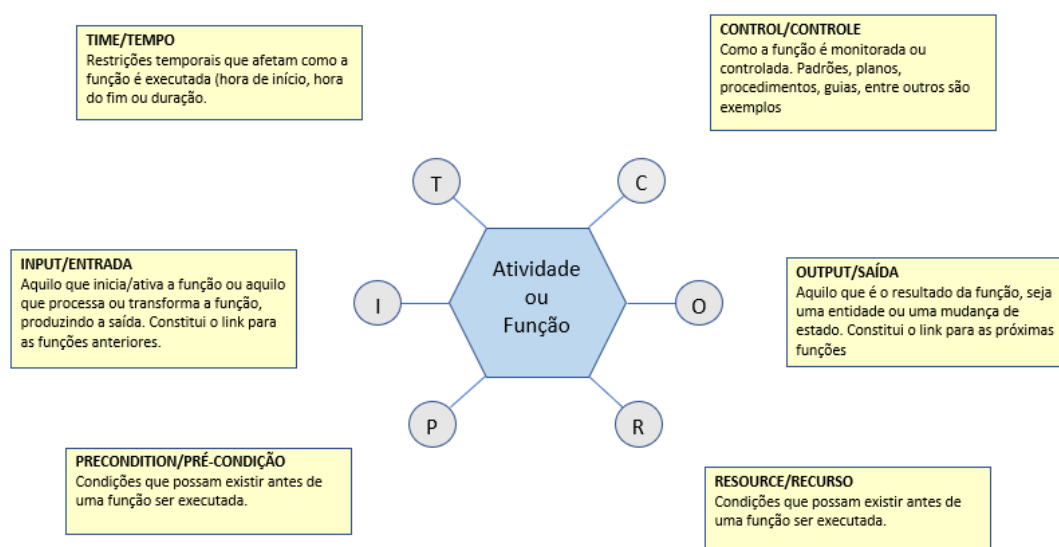


Figura 3 – Hexágono com as funções do FRAM. Fonte: Adaptado de Hollnagel, 2012

De acordo com o criador do método, Erik Hollnagel (2021), enquanto os métodos comumente usados explicam os eventos interpretando-os em termos de um modelo já existente, o FRAM é usado para modelar as funções necessárias para o sucesso do desempenho diário. Como o FRAM é um método e não um modelo, ele não faz suposições sobre como o sistema sob investigação é estruturado ou organizado, nem sobre possíveis causas e relações de causa e efeito.

Quando são abordados sistemas sociotécnicos complexos, que compreendem a interação humano-máquina, os acidentes ocorridos podem ser classificados como acidentes sistêmicos. O que distingue esses acidentes é o fato de que ocorrem múltiplas

falhas que interagem de uma forma não prevista. Isso significa que não existe uma causa raiz para esses acidentes, pois ocorrem interações de estados e eventos que existem apenas em certo momento (HOLLNAGEL, 2012).

Segundo Hollnagel (2012), a engenharia de resiliência sempre argumentou que a segurança é mais do que a ausência de falhas. Em seus vários trabalhos publicados, foram demonstradas as vantagens de ir além do erro humano e além do conceito de falha, assim como vários acidentes graves acentuaram a necessidade disso, e o FRAM pode preencher essa necessidade

2.3 A FORMULAÇÃO DA SITUAÇÃO PROBLEMA

De posse dos principais conceitos que envolvem o tema proposto, a principal base deste trabalho será a reanálise, através do Método FRAM, de um acidente de segurança de processo ocorrido devido ao transbordamento de 1700 litros de óleo combustível de um tanque de processo que estava sendo usado temporariamente como tanque de armazenagem do óleo. O relatório original usou o método de Árvore de Falhas na investigação.

De acordo com o método utilizado na ocasião da investigação, a causa imediata foi a ausência de resposta do operador ao alarme. A causa principal do acidente em termos de processo foi a falha da gestão de mudança realizada, que permitiu a retirada de uma camada de proteção do sistema, um intertravamento do volume do tanque com a bomba de carregamento no sistema temporário. No sistema original existia esse intertravamento, ao atingir um certo nível a bomba de carregamento de óleo parava.

A caracterização dos sistemas como lineares e previsíveis vem sendo questionada constantemente nos últimos tempos, uma vez que as combinações lineares não são suficientes para explicar os eventos e o porquê eles ocorrem. Nesse sentido, a abordagem da complexidade para o caso apresentado, constitui uma alternativa aos modelos analíticos tradicionais.

2.3.1 DETALHAMENTO DA OCORRÊNCIA

O vazamento de óleo combustível ocorreu em uma unidade de Geração de Energia devido ao transbordamento no Tanque *Buffer* (PBA-901,) durante o processo de descarregamento de caminhão-tanque bitrem ou durante o processo de partida dos motores. O momento do vazamento não foi identificado, o operador de campo identificou um volume 1700 litros de óleo combustível contido dentro do dique de contenção do Tanque *Buffer* (Figura 4) proveniente da tubulação “ladrão” deste tanque.

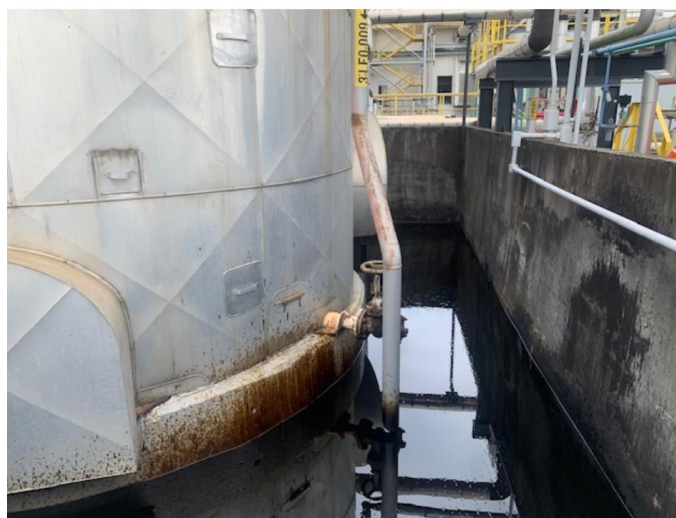


Figura 4 – Dique de contenção do Tanque Buffer (PBA-901) com o óleo derramado

Fonte: Relatório De Investigação e Análise Do Acidente, 2021

O processo de recebimento do óleo combustível, HFO (*High Fuel Oil*), é feito através de caminhões pelo Tanque *Storage* (PAB-901), via bombas PAA-901 A e B, porém, em função deste tanque encontrar-se em manutenção, houve a necessidade de recebimento de combustível através do Tanque *Buffer*. Para viabilizar essa operação foi feita uma modificação no processo de descarregamento.

Na configuração original o descarregamento do HFO é realizado para o Tanque *Storage* e este envia o HFO para o Tanque *Buffer* via bombas PAC-901 A e B. Na linha existe uma válvula XV de três vias que fica modulando o nível dos Tanques *Storage* e *Buffer*, esta válvula é utilizada para recircular o óleo para o Tanque *Storage* quando o nível alto do Tanque *Buffer* é atingido, conforme indicado na Figura 5.

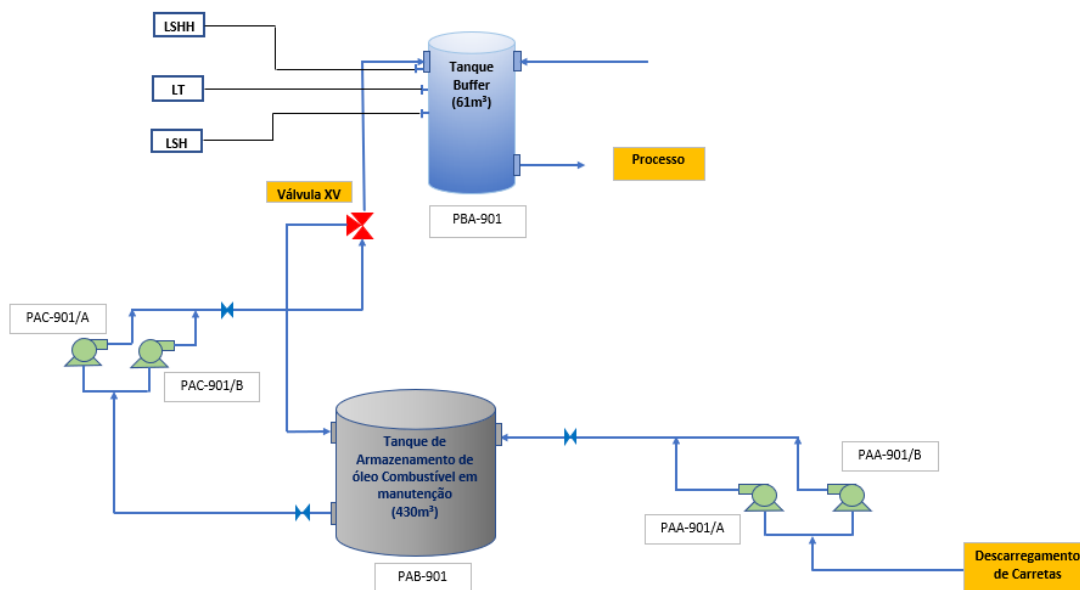


Figura 5 – Esquemático do processo original.

Fonte: Relatório De Investigação e Análise Do Acidente, 2021

Com a intervenção no Tanque Storage para manutenção, foi realizado o bloqueio em aberto da válvula XV para que o HFO recebido das carretas fosse transferido diretamente para o Tanque Buffer. Para isto, foi instalado um mangote na linha de descarga das bombas PAA-901 que se conecta a montante da XV, como mostra a Figura 6. A linha roxa representa o mangote saindo das bombas PAA-901.

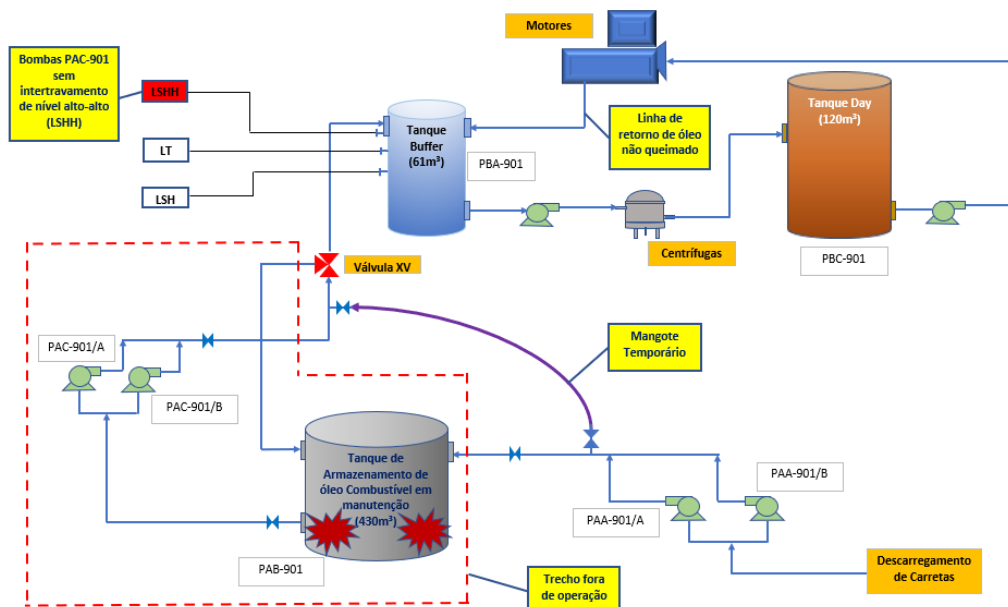


Figura 6 - Esquema temporário montado para abastecimento de óleo

Fonte: Relatório De Investigação E Análise Do Acidente, 2021

O nível indicado no LT (Transmissor de Nível) estava em 62,5% no momento do descarregamento da primeira carreta, ao realizar o descarregamento da segunda carreta o nível alto do Tanque buffer foi atingido, houve o LAH (Alarme de Nível Alto) na sala de controle, mas não houve a resposta dos operadores ao alarme.

A indicação no *trend* (Figura 7) mostra a geração da energia com a modificação de recebimento de HFO pelo Tanque *Buffer* desde o início do processo. Esta análise corrobora para a hipótese levantada de que o vazamento pode ter ocorrido durante o descarregamento. A seta indica que o limite de detecção do instrumento foi ultrapassado.

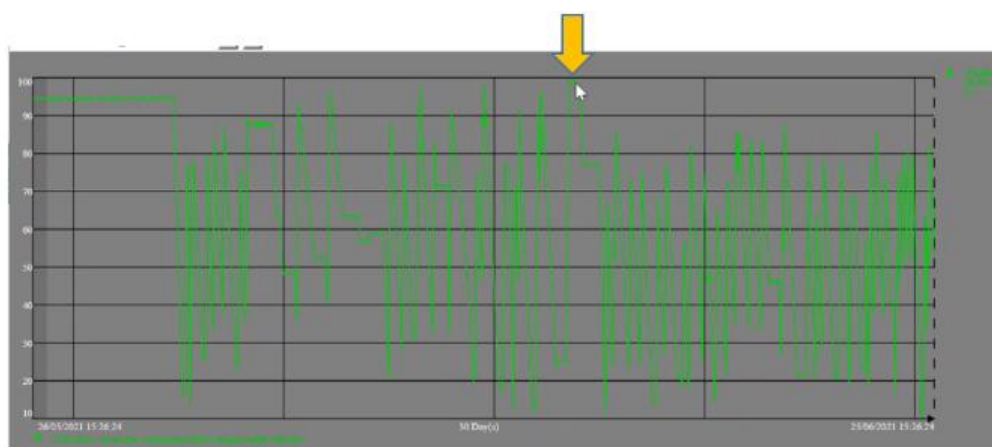


Figura 7 – Histórico do nível do tanque Buffer desde o início da operação temporária. A seta amarela indica o nível no dia do vazamento

Antes do final do descarregamento, a curva do Tanque *Buffer* se encontra com a do Tanque *Day* (linha vermelha na Figura 8) em aproximadamente 90% de nível do Tanque Buffer. Essa informação já é um alerta importante, pois os dois tanques estão em nível bem alto de HFO, mas o descarregamento continuou até o final, atingindo 100% do limite do LSH do Tanque *Buffer* e, como já informado, ultrapassado o limite.

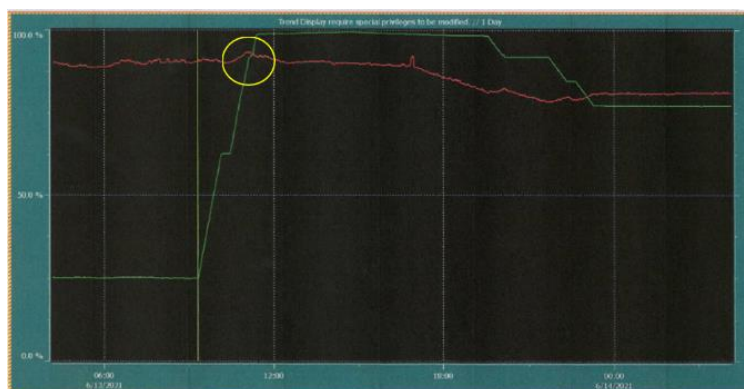


Figura 8 – Trend mostrando o LT do Tanque Buffer atingindo o limite de detecção

A outra hipótese levantada para o vazamento é que durante a partida dos motores, o óleo combustível não queimado retorna ao Tanque *Buffer*, sendo que este estava cheio.

No processo original havia o intertravamento do LSHH (Chave de Nível Muito Alto) do Tanque *Buffer* com as bombas PAC-901 A/B. Ao atingir o nível do LSHH a bomba que está operando desliga. Como mencionado, além do intertravamento, havia a recirculação entre o Tanque *Buffer* e o Tanque *Storage* (PAB-901) via válvula XV. Ao planejarem o sistema temporário a usina optou por deixar o Tanque *Buffer* sem intertravamento, o que deixou a proteção do processo dependente dos operadores.

Havia uma configuração possível de se utilizar o intertravamento para o processo, a de intertravar as bombas PAA-901 com o LSHH, mas não foi usada. A opção utilizada pela usina foi de usar as bombas PAA-901 para o descarregamento do HFO, usando um mangote para conectar as bombas na linha após as bombas PAC-901 e antes da XV, conforme mostrado na Figura 6.

Foi realizada uma Gestão de Mudança (GM) temporária para a modificação da linha de transferência de HFO para o Tanque *Buffer*. Foi identificado que o treinamento desta GM não foi realizado pois o supervisor e o operador de campo informaram que desconheciam a mudança.

Quanto ao processo de comunicação entre sala de controle e campo, segundo o relato do supervisor, foi realizado várias tentativas de comunicação com o operador de campo, via rádio, porém não houve retorno do operador de campo.

3. ANÁLISE DO ACIDENTE COM A METODOLOGIA FRAM

3.1 ÁRVORE DE FALHAS DO RELATÓRIO ORIGINAL

Segundo Zio (2007), a Árvore de Falhas é uma técnica, ou metodologia dedutiva e sistemática, que permite o desenvolvimento de relações causais que resultam em um determinado evento de falha indesejável. É dedutiva porque inicia por um evento de falha (evento topo) definido, revelando suas causas em ordem inversa até chegar às causas básicas.

A construção da árvore de falhas não é uma tarefa simples, uma vez que exige conhecimento do sistema em estudo. Também é necessário o conhecimento vertical, visto que a fidelidade da representação do evento indesejável, depende da definição precisa das ligações lógicas existentes entre os diferentes componentes do sistema e de seus modos de falha.

Basicamente o método busca traduzir uma ocorrência em item (sistema/equipamento/serviço) físico em um diagrama lógico estruturado em que certas causas especificadas (eventos básicos e eventos intermediários) levam a um evento topo pré-definido (LEE *et al.*, 1985).

A Árvore de Falhas utiliza símbolos que representam os eventos que podem ter contribuído para o evento topo como mostrado na Figura 9. Os eventos são conectados entre si por portas lógicas, sendo “e” e “ou” as principais, como pode ser observado na Figura 10.

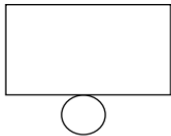
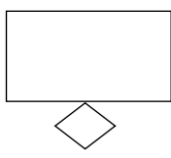
	Evento Falha - É usualmente o resultado da combinação lógica de outros eventos.
	Evento Básico - Falha do equipamento que não requer nenhum desenvolvimento adicional.
	Evento não desenvolvido - As falhas possíveis do evento não são desenvolvidas porque o evento apresenta uma consequência insignificante ou porque não possui informações suficientes.
	Porta "OU" - O evento de saída deve ocorrer se qualquer um dos eventos de entrada ocorrer.
	Porta "E" - O evento de saída deve ocorrer se e somente se todos os eventos de entrada ocorrerem.

Figura 9 – Símbolos utilizados na Árvore de Falhas

Fonte: N-2781 da Petrobras

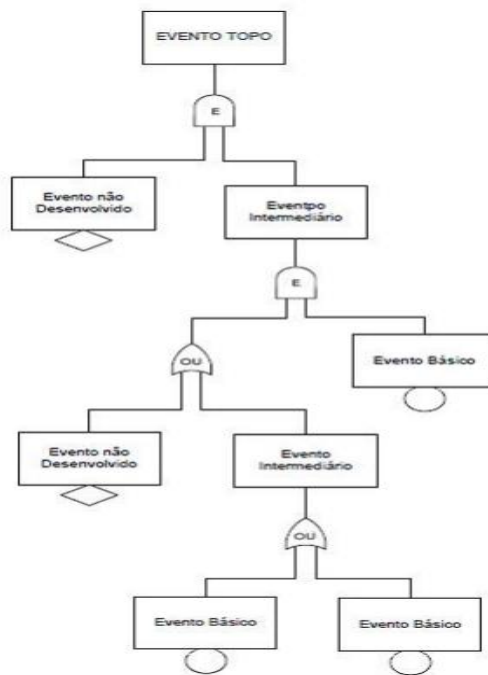


Figura 10 – Estrutura de uma Árvore de Falhas
Fonte: N-2781 da Petrobras

A investigação do acidente estudado encontrou cinco causas básicas utilizando o método da árvore de falhas, como mostrado na Figura 11.

Causa Básica 1 – Falha no Planejamento da Gestão de Mudança: Esta causa básica foi a mesma para dois eventos relacionados com a gestão de mudança realizada, a falta de intertravamento e a falta de previsão de treinamento.

O intertravamento evitaria o acidente e tiraria a responsabilidade da segurança do processo ser 100% dependente de manobras operacionais, mas, na gestão de mudança realizada para o sistema provisório, essa possibilidade foi desconsiderada, e o processo operou sem esse sistema instrumentado de segurança.

A mudança não foi divulgada para os operadores o que poderia ter contribuído para evitar o vazamento, pois todos os operadores teriam a chance de conhecê-la, discutí-la e até propor melhorias. Como não foi divulgada, a mudança ficou restrita apenas a quem participou dela. Essa falha poderia ter sido contornada se houvesse a previsão de uma tarefa para a realização de Instrução Operacional ou até mesmo uma revisão do padrão.

Causa Básica 2 – Falha no Cumprimento de Procedimento Operacional:

Havia um padrão que estabelecia um limite máximo para os tanques de 93%. Se esta regra estabelecida no padrão fosse cumprida não ocorreria o vazamento, haja vista que o LSH (chave de nível alto) atingiu 100% e mesmo assim o descarregamento de óleo combustível continuou.

Causa Básica 3 – Falha na Comunicação entre os Operadores: Houve problemas de comunicação via rádio entre sala de controle e campo que contribuiu para o vazamento. Várias tentativas de comunicação com o operador de campo, via rádio, foram feitas conforme relatado pelo supervisor de operação, podendo o vazamento ter ocorrido justamente no intervalo de tempo em que o processo de comunicação não ocorreu e o LSH já estava em 100% e continuava subindo acima do limite de detecção, já que o descarregamento de óleo combustível ainda continuava.

Causa Básica 4 - Falha no Acompanhamento de Nível e Alarmes: Os limites do LSH e do LT (Transmissor de Nível) foram ultrapassados e não houve resposta ao alarme, pois o LAH (Alarme de Nível Alto) foi desprezado. A falha no acompanhamento dos parâmetros operacionais no supervísório foi considerada uma causa básica, pois contribuiu diretamente para a ocorrência do vazamento.

Causa Básica 5 – Falha de Acompanhamento dos Indicadores de Campo: Durante todo o carregamento a usina estava com os motores parados, o que permitia ao operador de campo verificar com mais cuidado os níveis dos tanques e a possibilidade de vazamento, trabalhando em conjunto com a sala de controle.

Havia o LIT (Transmissor e Indicador de Nível) que permitia a visualização do nível do *Buffer* em campo e o operador poderia ainda ter subido no tanque para medição do nível com trena.

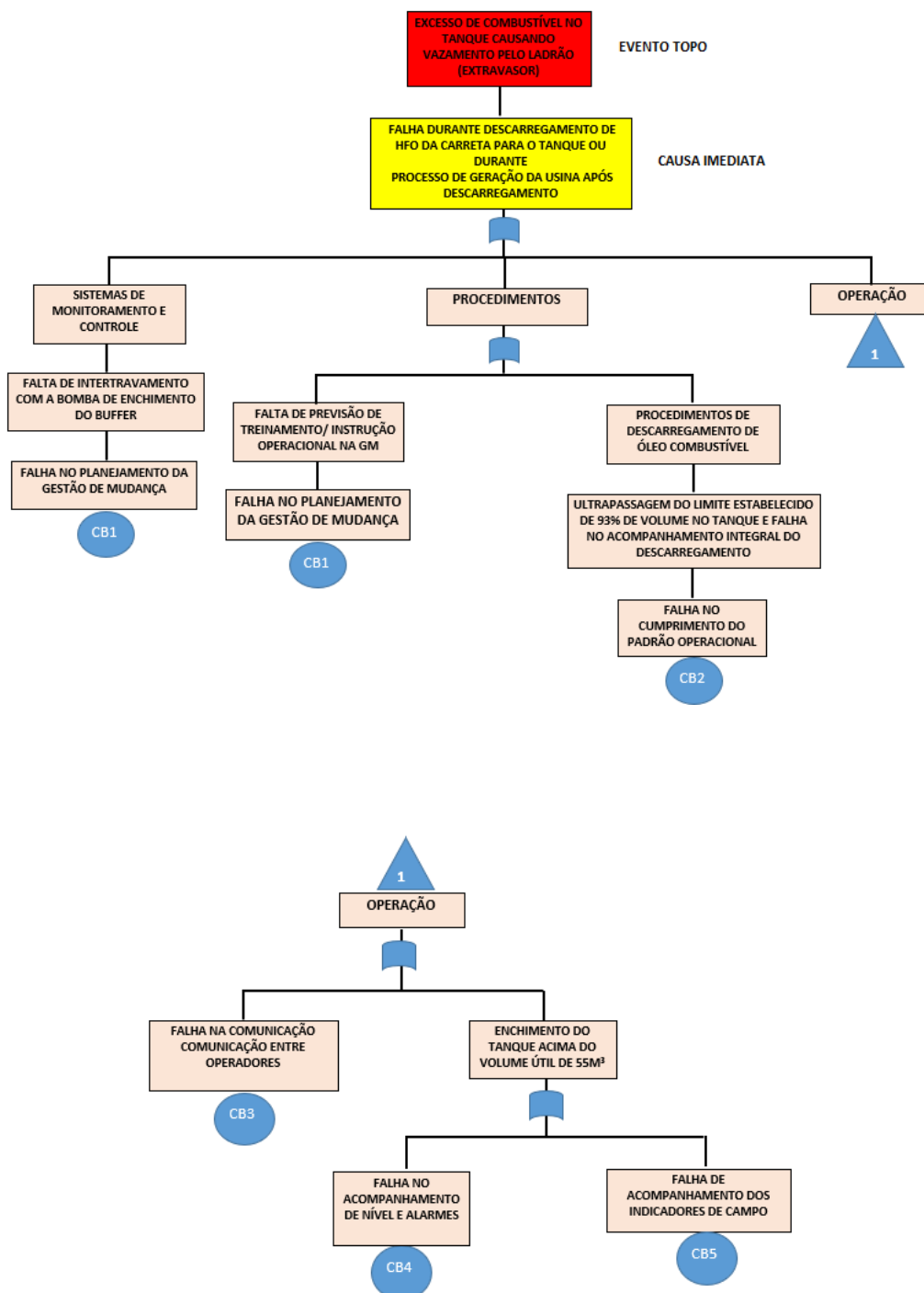


Figura 11 – Árvore de Falhas simplificada da investigação original do acidente
Fonte: Relatório De Investigação e Análise Do Acidente, 2021. (Adaptado pelos autores)

Conforme pode ser percebido a investigação teve um viés de buscar a culpabilidade dos operadores e não adentrou nas questões organizacionais e da gerência imediata dos operadores.

3.2 REANALISANDO O ACIDENTE USANDO O MÉTODO FRAM

O método FRAM permite retroalimentar a cadeia de eventos do acidente através da ressonância de seus acoplamentos. Como veremos a seguir, o método FRAM não é um processo algorítmico, mas sim o desenvolvimento gradual de um entendimento mútuo entre os profissionais que trabalham em equipe (FERREIRA e CAÑAS, 2019). O objetivo do FRAM é fazer de maneira simples, através da adoção de um hexágono de múltiplas entradas, uma discussão robusta de sistemas sociotécnicos complexos.

O vazamento de óleo combustível teve duas hipóteses. A primeira foi durante o descarregamento da carreta. Esta hipótese está representada pelos hexágonos amarelos nos fluxogramas do FRAM na Figura 12.

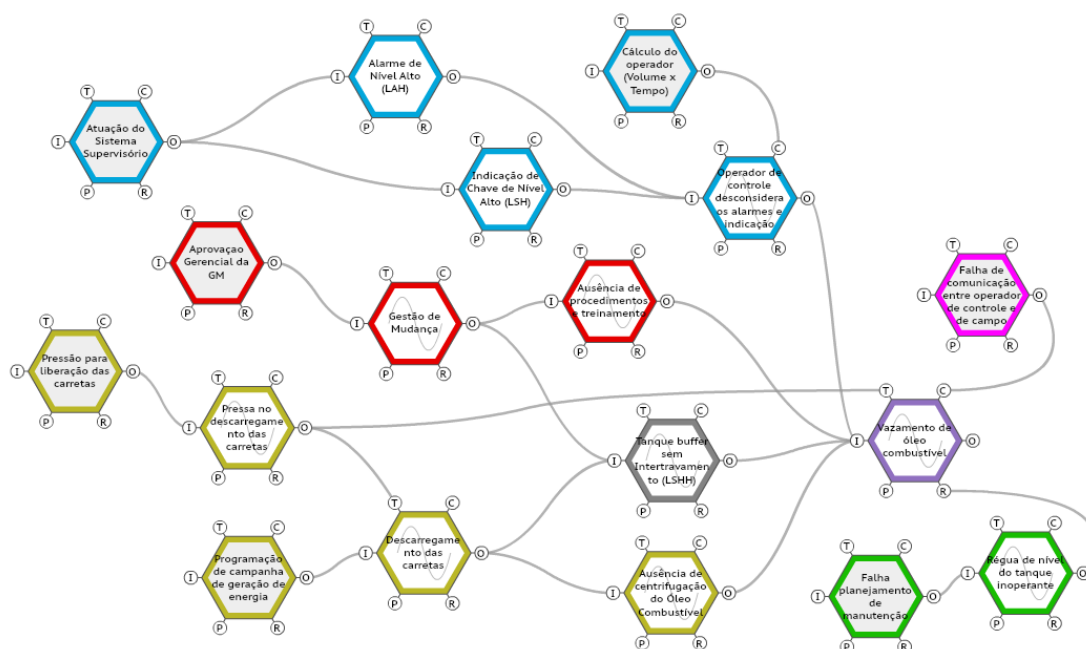


Figura 12 – O modelo FRAM da primeira hipótese acidental – Vazamento no descarregamento da carreta. Fonte: Autores, 2023

Na primeira hipótese, foi constatado que havia uma pressão (imposição) para liberação da carreta para esta voltar à sua base para carregar mais óleo combustível, pois já havia programação para isso, bem como programação para o início da geração de energia pelo início da noite.

Essa pressão, que é um fator organizacional, causou a pressão nos operadores para descarregar as carretas. Esse fato, aliado à falta de intertravamento do Tanque *Buffer* e a não centrifugação do óleo combustível, que faria com que o Tanque *buffer* diminuísse o volume, causou o transbordamento do tanque.

Analisando a função “Pressa no descarregamento das carretas”, é possível perceber as suas ressonâncias e onde ela reflete no sistema, observado na Figura 13. Essa função vai repercutir na função “Descarregamento das carretas” e essa, vai repercutir em mais duas funções que contribuíram diretamente para o vazamento.

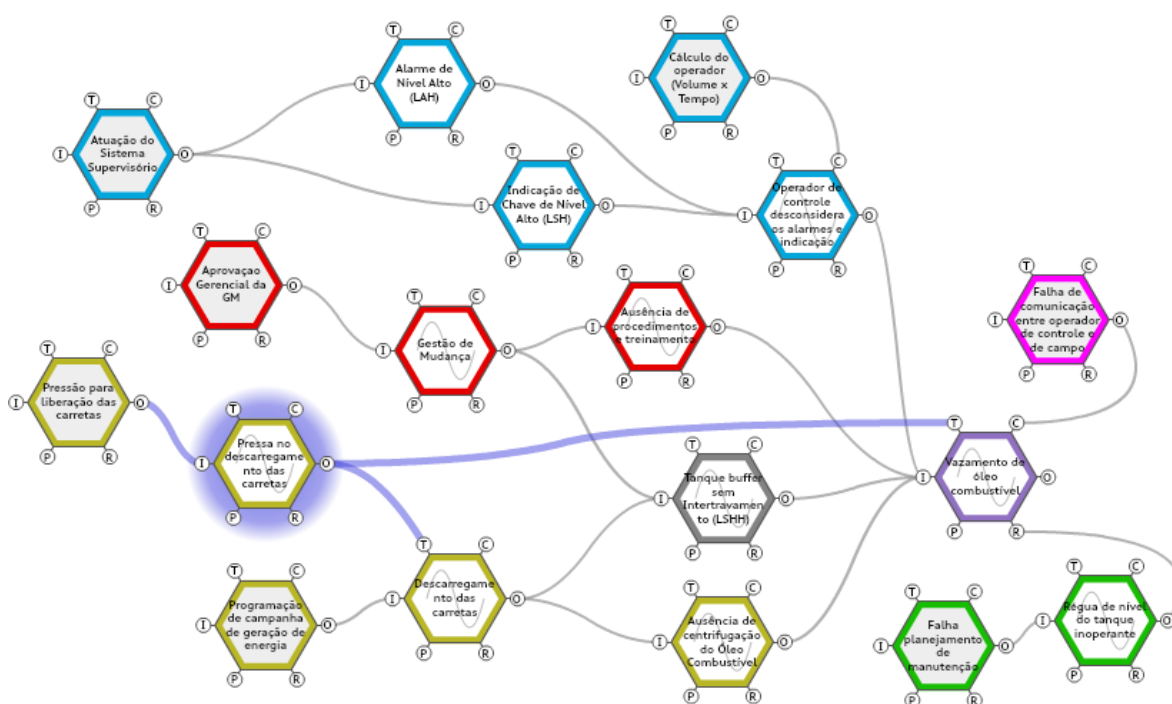


Figura 13 – Ressonância da função “Pressa no descarregamento das carretas”

Fonte: Autores, 2023

A segunda hipótese de transbordamento do tanque foi durante a partida dos motores para iniciar a geração de energia. Para isso foi considerada a hipótese de que o tanque não transbordou ao término do descarregamento, mas ficou muito próximo ao seu limite, como mostrado pelos hexágonos amarelos na Figura 14.

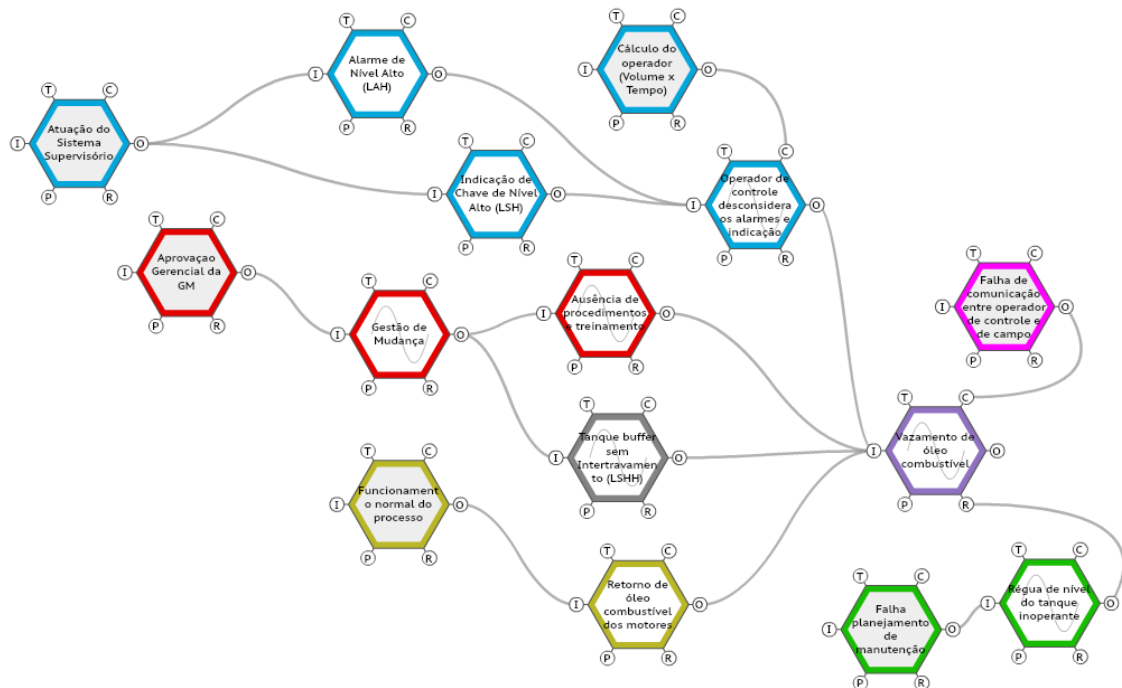


Figura 14 – O modelo FRAM da segunda hipótese acidental – Vazamento durante acionamento dos motores. Fonte: Autores, 2023

Quando os motores são acionados, o óleo que não entra em combustão nos motores retorna ao Tanque *Buffer* (Figura 15), como indicado na Figura 15, e durante esse processo houve o vazamento pelo extravasor do tanque (ladrão). Esse fato só pode ter ocorrido na partida dos motores pois, com a centrifugação do óleo e o consumo de combustível para geração de energia, o volume do *Buffer* vai diminuindo no decorrer do processo.

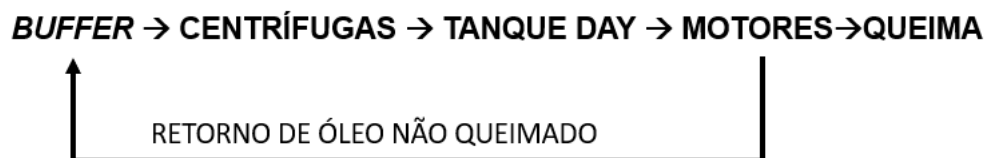


Figura 15 – Resumo do processo de retorno de óleo dos motores para a Tanque *Buffer*

3.2.1 CAUSAS COMUNS ÀS DUAS HIPÓTESES

Os hexágonos azuis mostram uma das funções tecnológicas do processo através do sistema supervisório e funções humanas, ou seja, a interação dos operadores com o sistema supervisório.

Como informado não havia mais o intertravamento do *Buffer* com as bombas PAC-901 e nem a modulação do processo com a válvula XV fazendo a recirculação do óleo combustível, desta forma todo o controle do processo dependia exclusivamente das respostas dos operadores aos sinais enviados pelo sistema supervisório e indicadores de campo.

Importante salientar que havia apenas um operador na sala de controle e este era o supervisor de operação que, além de controlar o processo nas telas do supervisório, fazia outras atividades de rotina. Havia também, no turno do acidente, mais um operador que ficava no campo, controlando a carreta, fazendo os alinhamentos dos equipamentos, entre outras atividades. Este arquétipo com dois operadores já era um padrão pré-definido, havendo uma variação entre dois e três operadores por turno da programação definida.

O supervisor fez os cálculos do volume de espaço vazio no tanque e confiou nesses cálculos, mesmo sabendo que estava no limite para caber o volume da carreta. Com essa certeza, não deu tanta relevância aos alarmes de nível alto (LAH) do supervisório, continuando suas atividades de rotina e preparação para a partida dos motores junto ao operador de campo. Este operador também não verificou as indicações nos medidores locais de nível. Assim, a desconsideração dos alarmes e indicações, contribuiu para o transbordamento do tanque, pois não houve nenhuma manobra operacional para abaixar o nível do tanque antes do descarregamento completo da carreta ou antes da partida dos motores. Essas providências só foram tomadas de imediato no turno seguinte.

Os hexágonos vermelhos mostram a gestão de mudança feita para o processo temporário. Não foi contemplada a realização de treinamento do novo processo com os operadores, não houve a solicitação de uma instrução operacional nem a revisão ou criação de procedimentos. A mudança detalhava como seria o novo processo, sendo que a comunicação entre os operadores foi feita de forma informal, sem nenhum registro. Também não foi analisada a possibilidade de instalação de um outro intertravamento para

dar segurança ao processo, evitando a perda de contenção. Esse intertravamento com as bombas PAA-901 foi instalado durante a investigação do acidente, por solicitação da comissão.

O fato que mais chamou a atenção da gestão de mudança realizada é que ela foi aprovada pelo gerente da planta, autorizando um controle de processo totalmente dependente dos operadores, fator que contribuiu diretamente para o acidente.

Outra função tecnológica analisada, representada no hexágono verde, foi a falta da régua de nível no Tanque *Buffer*. Existiam os instrumentos de campo que mostravam o nível do tanque, mas para visualizá-los o operador precisava se aproximar, ao contrário da régua de nível que pode ser vista de longe. Por falha de um fator organizacional, o planejamento de manutenção da régua de nível não foi realizado, haja vista que o conserto era uma recomendação do Hazop da unidade e havia sido adiado. A régua de nível seria um fator que alertaria o operador de campo que o nível do tanque estava no limite, sendo também uma causa que contribuiu para o vazamento.

3.2.2 VARIABILIDADES

Segundo Hollnagel (2012), a variabilidade de desempenho é, em geral, uma força e não uma desvantagem, e muitas vezes é a principal razão pela qual os sistemas sociotécnicos funcionam tão bem. Os seres humanos são extremamente hábeis em encontrar maneiras eficazes de superar problemas no trabalho, e essa capacidade é crucial tanto para a segurança quanto para a produtividade. Uma vez que o desempenho humano pode tanto melhorar quanto prejudicar a segurança e a qualidade do sistema, os métodos de avaliação devem ser capazes de lidar com essa dualidade.

Esse conceito ajuda a explicar o porquê a unidade operou 14 dias sem nenhum acidente, mesmo estando sem as proteções necessárias de 31/05/2021 quando o processo temporário teve início até 13/06 quando ocorreu o acidente. Isso é o que Hollnagel (2012), chama de sistema “intratável”, ou seja, nenhum sistema é capaz de resolver todas as variações sozinho, é sendo preciso ações do ser humano para lidar com todas as variações que possam ocorrer. No caso em questão, os operadores, encontraram métodos de manter

o sistema perfeitamente operacional nesse período de 14 dias, mesmo com as deficiências tecnológicas relatadas nas causas do vazamento.

Na prática o FRAM representa as variabilidades com um símbolo de uma curva dentro do hexágono (Figura 16).



Figura 16 – Representação da variabilidade

Fonte: Autores, 2023

Para exemplificar de maneira simples a variabilidade de uma função, pode-se imaginar uma atividade que não é rotineira, portanto, propensa à variabilidade. A função que tenha variabilidade está marcada no FRAM conforme a Figura 12.

4. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE DADOS E RESULTADOS

Segundo o relatório 621 da IOGP (2018), o importante a se considerar é que, quando uma investigação descobre um erro humano ou que lapsos contribuíram para a cadeia de eventos, a investigação não deve terminar, a equipe de investigação deve continuar procurando as condições e sistemas que os tornaram suscetíveis de ocorrer. Se for aceito precipitadamente que a falha foi do operador, irá se perder uma chance alta de considerar a existência de fatores externos que podem levar outros a cometer o mesmo erro. Não se deve colocar o erro humano como a causa raiz. O erro humano não é o ponto final, precisa-se entender o contexto de porquê o erro ocorreu. Entender o porquê o indivíduo se comportou de uma determinada maneira em determinado momento é fundamental, mas para isso deve-se evitar os seguintes erros:

- Supor que o comportamento das pessoas resulta da sua personalidade ou suas características, em vez dos sistemas ou condições nas quais trabalham (**Erro Fundamental de Atribuição**);
- Acreditar que se teria agido de forma diferente em circunstâncias iguais (**Viés de Excesso de Confiança**);
- Se basear demais no que se sabe agora (depois do acidente) para fazer julgamentos sobre o que as pessoas sabiam na ocasião do evento (**Viés de Retrospectiva**);
- Pesquisar e aceitar somente as evidências que confirmem as próprias hipóteses (**Viés de Confirmação**).

No modelo FRAM desenvolvido para o acidente foram encontradas abordagens diferentes da Comissão original. Na árvore de falhas as causas básicas tinham relação direta ou alguma relação com procedimentos, mas segundo o CCPS (2019) , que usa o método de análise pela Arvore de Causas, a falha em seguir um procedimento estabelecido não é uma causa básica. A abordagem deve ir mais fundo, como nos exemplos a seguir:

- O procedimento não era claro, difícil de seguir, estava desatualizado, a sequência de tarefas estava errada ou a situação de trabalho não estava contemplada;
- O empregado percebia que o perigo não era significativo (**qual foi o motivo dessa percepção?**);
- A execução e o monitoramento do procedimento eram inconsistentes;
- O empregado estava sob pressão de tempo devido à sobrecarga de trabalho (temporária ou crônica);
- Alguma ferramenta ou sobressalente estava faltando, exigindo improviso para execução da tarefa;
- O empregado já foi recompensado por violar o procedimento no passado (**era normal desconsiderar os procedimentos existentes para se atingir objetivos imediatos?**).
- As questões de gestão envolvidas nas falhas em seguir procedimentos também podem incluir políticas da empresa, normas, controles administrativos, práticas de supervisão, ou deficiências de treinamento.

Ao analisar o resultado apresentado pela comissão original, ficou claro que o apontamento de causas, em boa parte, responsabilizava os operadores pela ocorrência do evento, inclusive, sabe-se que como medida corretiva, houve a aplicação de advertências para os operadores envolvidos. Das 5 causas básicas apontadas na investigação feita através da árvore de falhas, responsabilizavam os operadores pela ocorrência, a saber: falha em não cumprir o procedimento, falha na comunicação entre os operadores, falha no acompanhamento de nível e alarmes e falha no acompanhamento de indicadores de campo.

Através do FRAM ficou claro que há grande influência de Fatores Humanos no desempenho dos operadores e, conseqüentemente, na gestão de riscos da planta. Como exemplo pode ser citado alguns fatores organizacionais, como a pressão para liberação da carreta na primeira hipótese, aliado a um fator tecnológico como a falta de intertravamento do Tanque *Buffer*, a não centrifugação do óleo combustível e outros fatores, que levaram ao transbordamento do tanque.

Já a interação entre os fatores tecnológicos e individuais que pode ser observada através da interação dos operadores com o sistema supervisor aliado a falta de intertravamento, mostra que todo o controle do processo foi deixado exclusivamente sob a respostas dos operadores.

De posse das observações e análises, feitas através do modelo FRAM, foi possível apurar muitos fatores que sequer foram considerados na investigação original. Foram apurados que os procedimentos eram inexistentes ou desatualizados, o supervisor de operação estava confiante nos seus cálculos, o que o fez considerar o risco de vazamento muito baixo ou até mesmo insignificante, a execução do procedimento de comunicação entre os operadores foi inconsistente, faltavam instrumentos para manter a segurança do processo (régua de nível, intertravamento e XV) e os treinamentos eram inexistentes ou deficientes.

Voltando à figura 7, esta mostra que o processo temporário entrou em operação em 26/05/2021 e o acidente ocorreu em 13/06/2021, ou seja, foram 18 dias operando sem as condições de segurança operacionais dadas pela instrumentação de controle para evitar o vazamento. Percebe-se com isso que os operadores se adaptam às circunstâncias, mas em um dado momento eles podem errar, e foi o que aconteceu. Os seres humanos são

propensos a erros e é praticamente impossível acertar o tempo todo. Conklin (2019) relata que o erro humano é esperado, que a culpabilização não consegue corrigir nada, que é o contexto que influencia o comportamento, que a aprendizagem é imprescindível para o bom andamento do processo e que a resposta da liderança a acidentes é muito importante.

Tudo isso corrobora com o fato de que os operadores tinham grandes chances de falharem, mas não por culpa deles, pois o erro humano como causa de um acidente, deve ser considerado como um sintoma da existência de problemas maiores, como foi possível observar.

5. CONCLUSÃO

Na reanálise do acidente feita neste trabalho utilizando o Método de Análise de Ressonância Funcional, o FRAM, foi possível ter uma visão sistêmica de tudo o que envolveu a ocorrência do evento, onde as funções essenciais do sistema foram identificadas e o potencial de variabilidade caracterizada. Observando o modelo do FRAM construído para esse estudo, é possível verificar que as funções (hexágonos) com seus aspectos definidos interagem de forma não linear.

A abordagem dos fatores humanos aplicada pelo método FRAM proporcionou uma análise mais coerente e robusta do que aconteceu no acidente, permitindo reconhecer fragilidades organizacionais e interações complexas que não puderam ser evidenciadas pela metodologia de análise linear utilizada (Árvore de Falhas). Dessa forma, o modelo FRAM deste acidente possibilitou demonstrar um maior número de fatores organizacionais contribuintes para o acidente, reconhecer a complexidade dos sistemas, conforme ocorrem, além de permitir o entendimento das interações entre os eventos. O Método FRAM também permitiu verificar que sempre haverá contribuições individuais para o acidente.

O FRAM sendo um método de análise qualitativa, mostrando um acidente de forma onde se possa visualizar todo seu contexto e as interações entre os eventos, pode ainda ser necessário se fazer uma integração com metodologias quantitativas de confiabilidade humana em trabalhos futuros, de forma a se ter uma análise ainda mais detalhada e completa de um acidente no que tange aos fatores humanos.

Embora o estudo tenha atingido os objetivos gerais e específicos propostos, é sugerido que o método FRAM seja disseminado e utilizado nas empresas com o objetivo de trazer a abordagem de Fatores Humanos para as comissões de investigação. Dessa forma é possível que se contribua cada vez mais para que os conceitos de Fatores Humanos sejam consolidados e o devido tratamento seja dado aos principais fatores que levaram a ocorrência do acidente.

REFERÊNCIAS

CASAGRANDE, Eduardo Alberto - Indicadores De Resiliência Para Gestão de Contingências Em Uma Empresa de Transporte Aéreo Regular, 2017.

CCPS - Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, Guidelines for Investigating Chemical Process Incidents, third ed, 2019.

CONKLIN, T - Os 5 princípios do desempenho humano: Uma atualização contemporânea das pedras fundamentais de construção do Desempenho Humano para a nova visão de segurança. Santa Fe: PreAccident Media, 2019.

FEDERAL AVIATION ASSOCIATION (FAA). FAA Research 1989 – 2002 - Human Factors in Aviation Maintenance and Inspection/Human Factors Guide for Aviation Maintenance. Publicação do Human Factors on Aviation Maintenance and Inspection (HFAMI), 2002.

Ferreira, P. N. P., & Cañas, J. - Assessing operational impacts of automation using functional resonance analysis method. *Cognition, Technology and Work*, 21, pages 535-552. <https://doi.org/10.1007/s10111-019-00540-z>, . Acesso em junho de 2023.

FRANÇA, Josué Eduardo Maia; HOLLNAGEL, Erik. - Recognition and Analysis of Human Factors and Non-Technical Skills Using the Functional Resonance Analysis Method – FRAM, 2019.

FRANÇA, Josué Eduardo Maia. – Material De Aula - Fatores Humanos & Segurança De Processo - 16th GCPS Aiche, 2021.

FRANÇA, Josué Eduardo Maia – O Que São Fatores Humanos? Revista Preven, 2020.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF OIL AND GAS PRODUCERS, Desmistificando Fatores Humanos: Construindo confiança na investigação de Fatores Humanos, 2018.

HOLLNAGEL, Erik. - FRAM, The Functional Resonance Analysis Method: Modelling Complex Socio-Technical Systems. Ashgate Publishing, Ltda, 2012.

HOLLNAGEL, Erik; GOTEMAN, Orjan. - The Functional Resonance Accident Model. Proceedings Of Cognitive System Engineering In Process Plant, p. 155-161, 2004.

Lee, W., Grosh, D., Tillman, F., Lie, C. - Fault Tree Analysis, Methods, and Applications - A Review. IEEE Transactions on Reliability, R-34, 194-203, 1985.

PETROBRAS Norma Técnica N-2781 - Técnicas Aplicáveis à Engenharia de Confiabilidade, Rev. C, 2021.

REASON, James. - Human error. Cambridge University Press, 1994.

HSE Books - REDUCING ERROR AND INFLUENCING BEHAVIOUR - HSG48, Second edition - Published 1999.

RIBEIRO, Antonio Carlos de Oliveira - Quantificação do Impacto de Fatores Humanos e Organizacionais Em Probabilidades de Falha Humana Usadas Em Análise Probabilística de Segurança - Tese Doutorado, 2012.

STEEN, R.; AVEN, T. - A Risk Perspective Suitable For Resilience Engineering. Safety Science, 2011.

VIDAL, Mario Cesar et al. - Introdução À Ergonomia. Apostila Do Curso De Especialização Em Ergonomia, COPPE/GENTE/UFRJ, 1999.

ZIO, E. An Introduction to the Basics of Reliability and Risk Analysis. Singapore, World Scientific Publishing Co. Re. Ltd, 2007.