



UFBA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

DOUTORADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

MARIA DE LOURDES DE ARAÚJO MENEZES

**METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO DE
SITUAÇÕES CRÍTICAS EM SEGURANÇA DE
PROCESSOS VIA INTEGRAÇÃO ENTRE
ERGONOMIA, MÉTODO DE RESSONÂNCIA
FUNCIONAL (FRAM) E FATORES HUMANOS**

PEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI
Salvador
2023

MARIA DE LOURDES DE ARAÚJO MENEZES

**METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO DE
SITUAÇÕES CRÍTICAS EM SEGURANÇA DE
PROCESSOS VIA INTEGRAÇÃO ENTRE
ERGONOMIA, MÉTODO DE RESSONÂNCIA
FUNCIONAL (FRAM) E FATORES HUMANOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Industrial.

Área de concentração: Desenvolvimento Sustentável de Processos e Produtos

Orientador: Prof. Dr. Assed Naked Haddad
Coorientador: Prof. Dr. Marcio Luis Ferreira Nascimento

**SALVADOR – BAHIA
2023**

M543 Menezes, Maria de Lourdes de Araújo.

Metodologia de identificação de situações críticas em segurança de processos via integração entre ergonomia, método de ressonância funcional (FRAM) e fatores humanos/ Maria de Lourdes Araújo Menezes. – Salvador, 2023.

135 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Assed Naked Haddad.

Coorientador: Prof. Dr. Marcio Luis Ferreira Nascimento.

Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial - Universidade Federal da Bahia - Escola Politécnica, 2023.

1. Fatores que afetam o Desempenho (FAD). 2. Engenharia de Resiliência. 3. Método de Análise de Ressonância Funcional (FRAM). I. Haddad, Assed Naked. II. Nascimento, Marcio Luis Ferreira. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD: 670

Metodologia de Identificação de Situações Críticas em Segurança de Processos via Integração entre Ergonomia, Método de Ressonância Funcional (FRAM) e Fatores Humanos

Maria de Lourdes de Araújo Menezes

Tese submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de doutora em Engenharia Industrial.

Examinado por:



Prof. Assed Naked Haddad

Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 1996.



Prof. Dr. Marcio Luis Ferreira Nascimento

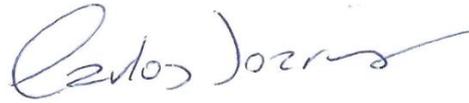
Doutor em Ciência e Engenharia dos Materiais pela Universidade Federal de São Carlos, Brasil, 2004.

Gilson B. A. Lima

Assinado de forma digital por Gilson
B. A. Lima
Dados: 2023.03.27 12:36:23 -03'00'

Prof. Dr. Gilson Brito Alves Lima

Doutorado em Engenharia de Produção pela COPPE-UFRJ, Brasil, 2000.



Prof. Dr. Carlos Alberto Pereira Soares

Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 1997.



Prof. Dr. Milind Siddhpura

Ph.D. in Mechanical Engineering, The University of Western Australia, UWA, Australia, 2013.



Prof. Dr. Erick Braga Ferrão Galante

Ph.D. in Defence and Security pela Cranfield University, Inglaterra, 2018.



Profa. Dra. Claudia Garrido Martins

Ph.D. in Engineering, The University of New Mexico, UNM, EUA, 2019.

SALVADOR - BAHIA
março de 2023

DEDICATÓRIA

A Deus, pela constante presença em minha vida; aos meus pais, pelos esforços sem precedentes na minha formação pessoal, ética e profissional; aos meus professores pelo constante empenho e dedicação e aos meus amigos que tanto contribuíram e incentivaram para a realização de mais essa etapa de vida.

A minha madrinha Clarita da Encarnação que me apoiou sempre.

Ao meu marido, amigo e parceiro na vida, pelo apoio, sempre contribuindo para minha melhora como pessoa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por proporcionar a minha existência e permitir este valioso momento, que muitos gostariam de passar, mas que por falta de oportunidades, não tiveram esta chance.

Aos funcionários e professores da Universidade Federal da Bahia – Escola Politécnica departamento de Engenharia Industrial – Programa de Engenharia de Engenharia Industrial, que com grande capacidade, profissionalismo e dedicação que estes possuem, nos proporcionaram a aquisição de novos conhecimentos.

Aos nossos amigos e familiares que nunca deixaram de nos apoiar nos momentos mais difíceis e por nos suportar quando éramos mais inconvenientes.

Aos funcionários da empresa visitada, que nos dedicaram tempo e recursos, nos fornecendo todas as informações, dados e acessos para a elaboração deste estudo.

Aos Professores dr. Paulo Victor Rodrigues de Carvalho e Dra. Maria Egle Cordeiro Setti pelo apoio incondicional nos momentos difíceis, sempre solícitos e tranquilos.

Ao Prof. Assed Naked Haddad pelo apoio recebido.

Ao Prof. Marcio Luis Ferreira Nascimento pela sempre presente dedicação e determinação na minha orientação. Seu apoio e incentivo foram decisivos na conclusão dessa tese.

Ao grande pesquisador Erik Hollnagel pela ajuda e troca de ideias para a elaboração desse trabalho.

Ao Prof. Isaac José Antonio Luquetti dos Santos (*in memoriam*), meu orientador de mestrado pela oportunidade de crescimento.

"O verdadeiro ato da descoberta não consiste em encontrar novas terras, mas sim em vê-las com novos olhos"

Marcel Proust

"A criatividade, aliada a curiosidade e a perseverança, é a mola mestra do avanço tecnológico"

Gerson Luis Moraes Menezes

RESUMO

Esta tese desenvolveu uma metodologia para avaliar a segurança de processos sistêmicos para sistemas sociotécnicos industriais. O ponto forte foi o caráter interpretativo que parte do estudo do contexto através da ergonomia francesa contemporânea, apoiando-se no método FRAM (*Functional Resonance Analysis Method*). Através de sua linha de interpretação e detalhamento e observação das atividades, identificou-se as funções principais e de apoio para a construção das instanciações. A tese utilizou resultados da aplicação de dois referenciais metodológicos diferentes para identificar as funções críticas que afetam a segurança do processo em uma indústria química: FRAM e os Fatores que Afetam o Desempenho (FAD, do inglês *Performance Shaping Factors*), sendo o que o último envolveu a participação ativa dos operadores aplicados num mesmo processo sociotécnico. Três respostas fenotípicas foram integradas, com base no FRAM, a saber: tempo, precisão e duração. Um referencial metodológico baseado em fatores humanos selecionou as chaves críticas via FAD, estas utilizadas como indicadores, para identificar as atividades críticas no processo conforme a percepção do operador. Este estudo demonstrou que alguns acoplamentos envolvendo a variabilidade de resultados podem ser diferentes em alguns aspectos no processo automatizado quando comparado ao de batelada (ou lote). A integração dos fenótipos de duração com tempo (cronometragem) de integração e precisão pode modificar os resultados da variabilidade no processamento em batelada. Um aspecto importante dos resultados envolveu a observação de que a gestão humana se adapta e pode mitigar riscos envolvidos. Particularmente, a competência e o conhecimento dos operadores podem eliminar o tempo de função bem como minimizar a tarefa, modificando a sequência de trabalho do processo. A comparação dos resultados demonstrou a compatibilidade entre duas diferentes análises, a saber: FRAM e FAD. A utilização de questionário para obter informações sobre os fatores que afetam o desempenho humano mostrou-se bem-sucedida, aumentando a participação do usuário em um sistema sociotécnico e ao mesmo tempo identificando atividades críticas do processo. O desenvolvimento de estudos futuros utilizando o FRAM em conjunto com outras ferramentas pode servir para fortalecer novos processos sociotécnicos.

Palavras-chave: Fatores que Afetam o Desempenho (FAD), Engenharia de Resiliência, Método de Análise de Ressonância Funcional (FRAM).

ABSTRACT

This dissertation developed a methodology to assess the safety of systemic processes for industrial sociotechnical systems. The strong point was the interpretative character that starts from the study of the context through contemporary French ergonomics, relying on the FRAM (Functional Resonance Analysis Method). Through its line of interpretation and detailing and observation of activities, the main and support functions for the construction of instantiations were identified. The thesis thus used results from the application of two different methodological frameworks to identify the critical functions that affect process safety in a chemical industry: FRAM and Performance Shaping Factors (PSF), the latter involving operators' active participation, were applied on the same sociotechnical process. Three phenotype responses were integrated, based on FRAM, namely timing, precision, and duration. A methodological framework based on human factors had selected the critical key PSF, used as an indicator, to identify the critical activities in the process, by operator's perceptions. This study demonstrated that some result variability couplings can be different in some aspects in the automated and batch process. The integration of duration phenotypes with integration timing and precision, that can modify the results of variability in a batch process. One key aspect was related to human being management observation, that can adapt and mitigate risks. Particularly, operator competence and knowledge can eliminate function and task time by modifying the work sequence of the process. Comparison results demonstrated the compatibility of both FRAM and PSF analyses. The use of a questionnaire to obtain information on factors that affect human performance proved to be successful, increasing user participation in a sociotechnical system and identifying critical activities of the process. The development of future practical studies, utilizing FRAM in conjunction with other tools, can be served to strengthen new sociotechnical processes.

Keywords: Performance Shaping Factors (PSF), Resilience Engineering, Functional Resonance Analysis Method (FRAM).

LISTA DE PUBLICAÇÕES

MENEZES, M. L. A.; DOS SANTOS, I. J. A. L.; Avaliação das Condições de Trabalho no Setor Industrial: Uma Abordagem Centrada na Ergonomia Física e Organizacional. **Ação Ergonômica** v. 9 (2014) p. 67 - 85.

MENEZES, M. L. A.; HADDAD, A. N.; NASCIMENTO, M. L. F. Functional Resonance Analysis Method and Human Performance Factors Identifying Critical Functions in Chemical Process Safety. **IEEE Access**, v. 9 (2021), p. 168368 - 168382.

MENEZES, M. L. A.; HADDAD, A. N.; NASCIMENTO, M. L. F. Practical Application of Ergonomic Methodology Identifying Critical Activities in a Metallurgical Electrolysis Unit. **IEEE Access**, v. 10 (2022), p. 109132 - 109152.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Interdisciplinaridade da Ergonomia, mostrando os diversos problemas abordados por esta ciência e suas interações. Entre os diversos conhecimentos destacam-se algumas das ciências humanas e sociais, como a psicologia e a sociologia, além de ciências da vida como a medicina e diversas engenharias. Ao levar em consideração fatores físicos, ambientais, cognitivos, coletivos e individuais, organizacionais, sociotécnicos e outros fatores relevantes, a ergonomia visa antecipar riscos bem como compreender as complexas interações entre o ser humano e outros humanos, o meio ambiente, ferramentas, produtos, equipamentos e tecnologia. Adaptado de [Hubault \(1992\)](#).

Figura 2. Exemplo FRAM do preparo de chá. Cada hexágono representa uma função ou atividade, e as siglas nos vértices representam os seguintes aspectos: entrada (*I*, ou input); saída (*O*, ou output); pré-condição (*P*); recursos (*R*); controle (*C*); tempo (*T*). As letras gregas (α , β , γ , δ , ϵ , ζ) indicam detalhes dos respectivos aspectos a serem descritos no Capítulo 2.

Figura 3. Resumo da proposta na tese, que vincula ergonomia, FRAM e FADs. Enquanto a ergonomia identifica as principais funções e de apoio num processo produtivo, o FRAM consegue ilustrar os acoplamentos entre funções (ou atividades) e estimar a variabilidade de desempenho das mesmas funções. Assim, a ergonomia se associa ao FRAM por meio de atividades principais e de apoio, enquanto os FADs podem comparar os resultados obtidos através das respostas da percepção dos usuários do processo sociotécnico com a análise FRAM.

Figura 4. Campo de estudo da ergonomia, onde a situação de trabalho é dividida entre a empresa e o trabalhador. Há observâncias de contrato, tarefas prescritas e atualizadas, além da atividade de trabalho. Tal ciclo leva em conta aspectos de saúde e produção. Adaptado de [Gontijo e Motter \(2012\)](#).

Figura 5. A AET apresenta três etapas básicas, envolvendo a análise da demanda, da tarefa e das atividades ao propor dados e hipóteses em cada situação. Ao fim da análise das atividades é efetuado um diagnóstico que leva a recomendações ergonômicas. Adaptado de [Gontijo e Motter \(2012\)](#).

Figura 6. Os seis aspectos que caracterizam uma função ou atividade: *i*) Tempo (*T*): aspectos temporais que afetam a forma como a função é executada (limitação de recurso); *ii*) Entrada (*I*): o que supervisiona ou regula a função, por exemplo planos, procedimentos, diretrizes ou outras funções; *iii*) Pré-condição (*P*): situações que devem ser cumpridas antes de uma função ser realizada; *iv*) Controle (*C*): o que ativa a função e/ou é usado ou transformado no procedimento de saída. Constitui *link* para as funções a montante; *v*) Saída (*O*): o que é resultado da função e estabelece *links* para funções a jusante; *vi*) Recurso (*R*): o que é necessário ou consumido pela função quando ativa (matéria, energia, competência, software, mão de obra...). Adaptado de [Hollnagel \(2012\)](#).

Figura 7. Descrições de todos os aspectos apresentados na [Figura 2](#), sobre o procedimento desde o preparo até a degustação de um chá ilustrado pelo método FRAM para seis funções, a saber: *i*) Obter chá; *ii*) Esquentar água; *iii*) Dispensar chá na água quente; *iv*) Esperar por 4 minutos; *v*) Acrescentar açúcar; *vi*) Beber chá pronto. Os aspectos vinculados as tais funções são: Obter chá (α); Chá obtido (β); Obter chá (γ); Chá em infusão (δ); Infusão finalizada (ϵ); Chá adoçado (ζ).

Figura 8. Fluxograma representativo da metodologia proposta descrito em cinco etapas: 1) Identificação e mapeamento do campo de trabalho; 2) Aplicação do FRAM no local de trabalho; 3) Processo de validação por meio de fatores humanos; 4) Comparação dos resultados das atividades críticas obtidas via FRAM e a aplicação de fatores humanos com a percepção dos usuários do processo sociotécnico; 5) Recomendações e elaboração de planilha de atividades críticas com proposta de medidas de controle e prioridade de intervenção.

Figura 9. Proposta metodológica para identificar atividades críticas comparando o referencial metodológico FRAM com os FADs. Esta apresenta uma comparação entre o método FRAM e o uso dos FADs elaborado nesta tese visando identificar as atividades críticas por meio da aplicação de medidas de controle. Desta figura, a abordagem ergonômica a partir da observação do local de trabalho levou ao uso do FRAM, enquanto a observação de procedimentos operacionais e o uso de questionários permitiu o desenvolvimento de FADs e consequentemente a escolha de atividades críticas que levou ao uso de indicadores e a aplicação de medidas de controle.

Figura 10. Estação de descarga dos caminhões.

Figura 11. Instanciação nominal do processo de descarga de ácido, onde é possível perceber os funcionários usando os EPIs necessários.

Figura 12. Acoplamento ponto a ponto entre a saída da Função 1 (F₁, referente ao apoio na manobra dos tanques de ácido) para a entrada e a pré-condição da Função 2 (F₂, referente a chegada do caminhão tanque), vinculados a planta de descarregamento de ácido. As funções de fundo B₁, B₂ e B₃ são representadas por hexágonos com contornos verdes, e as principais, hexágonos com contornos azuis. Dois aspectos da função posterior F₁ estão vinculados a saída da função a montante (*output O*).

Figura 13. A instanciação nominal do processo de descarga de ácido, representando o procedimento padrão operacional esperado. Cada hexágono representa uma etapa do processo produtivo de trabalho, complementando a figura anterior com novas funções, de F₃ a F₁₀.

Figura 14. Instanciação real de processo de descarregamento de ácido em uma indústria química. Através da observação das atividades sendo executadas e suas dinâmicas, foi elaborada esta sequência de instanciação. Linhas grossas representam variabilidades de acoplamento significativas.

Figura 15. Representação percentual de tempo de todas as atividades desenvolvidas pelo operador durante um turno de trabalho, correspondente as 14 funções indicadas na **Figura 13**, incluindo as três funções de fundo, identificadas por B₁, B₂ e B₃. A distribuição temporal das atividades está na ordem em que foi realizada a sequência cronológica do ciclo de trabalho, totalizando 141 minutos.

Figura 16. Modelo FRAM da área de descarga ácida em estudo, apresentando os acoplamentos identificados como ressonantes mais significativos com uma linha vermelha, após a análise da variabilidade.

Figura 17. Perfil do grau de influência do FAD considerando as quatro categorias, (organizacional ●; tecnológico ▲; humano ◆; complexidade da tarefa ■), mostrando a função do FAD enquanto uma linha cheia.

Figura 18. Atividade de inspeção do tanque, atividade sendo realizada na plataforma.

Figura 19. Operador abrindo a boca de visita atividade de inspeção sendo realizada na plataforma.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Consequência da variabilidade a montante e a jusante (MACCHI, 2010). As setas indicam variabilidades aumentando (\uparrow), diminuindo ou amortecendo (\downarrow), ou ainda mantendo-se inalterada (\leftrightarrow). Há situações onde mais de um caso pode ocorrer, como por exemplo quando a função a jusante está apenas esperando pela entrada (*), e esta pode requerer tempo adicional; desta forma, possivelmente pode amortecer a variabilidade.

Tabela 2. Justificativa das consequências da variabilidade do montante no aspecto de entrada da função a jusante, usando a integração dos processos analisados considerando processos contínuos ou automatizados (MACCHI, 2010).

Tabela 3. Descrição elaborada da variabilidade de saída envolvendo cinco aspectos: tempo / duração; força / distancia / direção; objeto errado e sequencia, conforme Hollnagel (2012).

Tabela 4. Consequência da variabilidade a montante na variabilidade a jusante, através da integração de três características temporais: *timing* (cronometragem), precisão e duração, envolvendo processos contínuos e em bateladas. As siglas representam os seguintes aspectos: entrada (*I*, ou input); saída (*O*, ou output); pré-condição (*P*); recursos (*R*); controle (*C*); tempo (*T*). (\uparrow) significa que a variabilidade provavelmente *aumenta*; (\downarrow) significa que a variabilidade provavelmente *diminui*; (\leftrightarrow) significa que a variabilidade se mantém *inalterada*. A integração dos fenótipos *timing* (cronometragem) com precisão está representado por T+P, sendo que as setas idênticas indicando uma mesma variabilidade foram realçadas com cores a fim de melhorar a visualização

Tabela 5: Resultados estatísticos para média (*m*), desvio padrão (*sd*), função de fundo (B_i), função de primeiro plano (F_i) dos graus de influência FAD.

Tabela 6: Funções em ordem de criticidade, sendo B_i as funções de fundo e F_i as funções de primeiro plano.

Tabela 7. Medidas de controle adotadas na área de descarregamento de ácido para algumas das funções destacadas nesta tese, vinculadas aos acoplamentos ressonantes mais significativos da **Figura 16.**

LISTA DE SIGLAS

ABERGO: Associação Brasileira de Ergonomia

ACH: Análise de Confiabilidade Humana

AET: Análise Ergonômica do Trabalho

B_i: Função de fundo *i*

BP: Processo em bateladas

BV Boca de visita

C: Controle

CAP: tampão de proteção

CP: Processo contínuo

EPI Equipamento de proteção individual

FAD: Fatores que Afetam o Desempenho

F_i: Função *i*

FMV: *FRAM Model Visualizer* (Modelo Visualizador FRAM)

FRAM: *Functional Resonance Analysis Method* (Método de Análise de Ressonância Funcional)

HAZOP: *Hazard and Operability* (...)

I: *Input* (entrada)

NR 17: Norma Regulamentadora 17

O: *Output* (saída)

OECD *Nuclear Energy Agency* (Agencia de Energia Nuclear)

P: Pré-condição

PSF: *Performance Shaping Factors*

PVC: polyvinil chloride – policloreto de polivinila (ou policloreto de vinil),

R: recursos

T: Tempo

T+P: tempo cronometragem mais precisão

T₁: Caminhão tanque 1

T₂: Caminhão tanque 2

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE SIGLAS	xvi
1. INTRODUÇÃO	20
1.1. Apresentação do Tema da Pesquisa	27
1.2 Relevância Geral do Tema	27
1.3. Hipótese do Estudo	28
1.4. Objetivo Geral	30
1.5. Objetivos Específicos	30
1.6. Justificativa	31
1.7. Originalidade da Tese: Inovação, Contribuições e Limitações	32
1.8. Estrutura da Tese	33
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	34
2.1. Sistemas Sociotécnicos Complexos	34
2.2. Engenharia de Resiliência	36
2.3. Ergonomia	38
2.3.1. Análise Ergonômica do Trabalho	39
2.3.2. Importância do Tempo e Conhecimento do Operador da Área de Trabalho na Análise Ergonômica	43
2.4. Método da Análise de Ressonância Funcional (FRAM)	44
2.5. Uso das Características Temporais em Instanciações FRAM	50
2.6. Avaliação das Características do <i>Timing</i> ou no Início da Função	50
2.6.1. Avaliação Quanto à Característica Temporal de Precisão	51
2.6.2. Avaliação Quanto à Característica Temporal da Duração	52
2.6.3. Análise da Variabilidade dos Acoplamentos Através da Integração das Três Características Temporais	53
2.7. Fatores Humanos: Fatores de Modelagem de Desempenho	60
3. METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DE SITUAÇÕES CRÍTICAS EM SEGURANÇA DE PROCESSOS.....	63
3.1. Primeira Etapa: Estudo Ergonômico do Sistema Sociotécnico	68

3.2. Segunda Etapa: Interligação com a Metodologia FRAM	69
3.2.1. Identificação do Desempenho da Variabilidade Incluído com Fenótipo de Duração de Integração Visando Refinar a Análise	69
3.2.2. Agregação da Variabilidade Visando Identificar Atividades Críticas	70
3.3. Terceira Etapa: Processo de Validação via Fatores Humanos na Identificação das Atividades Críticas pelos Fatores de Desempenho Escolhidos como Indicadores	72
3.3.1. Identificação das Atividades Críticas no Procedimento Operacional usando FADs Através dos Resultados dos Questionários Distribuídos	72
3.3.2. Identificação das Atividades Críticas por meio de FADs Críticos	74
3.4. Quarta Etapa: Comparação dos Resultados	75
3.5. Quinta Etapa: Adoção de Medidas de Controle	76
4. AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA: APLICAÇÃO EM ESTUDO DE CASO	78
4.1. Descrição do Estudo de Campo: Área de Descarga Ácida	78
4.2. Apresentação dos resultados obtidos	82
4.3. Cenário Nominal	84
4.4. Identificação das Funções Principais e de Apoios na Instanciação Nominal	88
4.5. Descrição das Funções Principais do Sistema de Descarregamento de Ácido	88
4.6. Cenário Normal	92
4.6.1. Descrição das Funções da Instanciação Real no Sistema de Descarregamento de Ácido	94
4.6.2. Descrição das Funções Adicionais da Instanciação Real no Sistema de Descarregamento de Ácido	95
4.6.3. Observação das Atividades de Quantificação de Tempo	96
4.6.4. Observações na Na álise da Instanciação Real Realizada	97
4.6.5. Identificação das Situações Críticas Relevantes na Fase de Avaliação Ergonômica	98
4.7. Aplicação da Metodologia no Processo em Bateladas Analisando as Consequências da Saída da Função a Montante nos Aspectos da Função a Jusante	99
4.7.1. No Procedimento Analítico, as Variabilidades Exógenas e Endógenas são Analisadas no Resultado dos Acoplamentos	99

4.7.2. Procedimento Analítico dos Resultados dos Acoplamentos usando o Indicador Agregado	100
4.7.3. Resultados Analíticos da Variabilidade entre as Funções de Primeiro Plano F₂ e F₃	101
4.7.3.1. Medidas de Controles Adotadas e Planejadas	101
4.7.4. Resultados Analíticos da Variabilidade entre as Funções de Primeiro Plano F₄ e F₅	101
4.7.4.1. Medidas de Controles Adotadas e Planejadas	102
4.7.5. Resultados Analíticos da Variabilidade entre as Funções de Primeiro Plano F₆ e F₇	102
4.7.5.1. Medidas de Controles Adotadas e Planejadas	103
4.7.6. Resultados Analíticos da Variabilidade entre as Funções de Primeiro Plano F₇ e F₈	103
4.7.6.1. Medidas de Controles Adotadas e Planejadas	104
4.7.7. Resultados Analíticos da Variabilidade entre as Funções de Primeiro Plano F₁₁ e F₁₂	104
4.7.7.1. Medidas de Controles Adotadas e Planejadas	104
4.7.8. Funções Críticas Identificadas no Estudo da Variabilidade pelo FRAM	105
4.7.9. Análises de Contexto FAD com Base no Procedimento Operacional de uma Unidade de Descarga de Ácido	105
4.7.10. Escolha dos FADs que podem Afetar o Desempenho dos Operadores	107
4.7.11. Análise Sobre a Identificação das Atividades Críticas no Procedimento de Operação usando FAD Crítico por Indicadores	108
5. DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS.....	115
6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	122
APÊNDICES	
APÊNDICE 1	124
APÊNDICE 2	126
APÊNDICE 3	127
REFERÊNCIAS	128

1. INTRODUÇÃO

Os processos químicos envolvem quantidades substanciais de materiais potencialmente perigosos, como toxinas, explosivos e materiais inflamáveis que são expostos a condições extremas como alta temperatura e/ou pressão, podendo ocasionar acidentes com perda de vidas humanas, além de incorrer em custos econômicos (RODRÍGUEZ e DÍAZ, 2016). A segurança dos processos químicos no contexto sociotécnico específico da indústria prescinde de técnicas capazes de regular as interfaces que resultam em falhas da tarefa. Nesse contexto, as atividades de treinamento, o conhecimento específico de ergonomia e os fatores humanos, bem como o aproveitamento do capital humano e intelectual, constituem elementos da cultura de segurança organizacional que devem ser continuamente aperfeiçoados.

A evolução da tecnologia tem sido rápida no processo industrial e os seres humanos são naturalmente afetados. A parte social do sistema é de vital importância, o que significa que não só a estrutura física de uma indústria, mas toda sua estrutura sociotécnica deve ser levada em conta. Os membros da equipe (gerentes, supervisores, operadores, etc.) têm que lidar com informações heterogêneas e ocasionalmente conflitantes, bem como a pressão para trabalhar sob o estresse de altas cargas de trabalho (BULLEMER e LABERGE, 2010).

Essa tese se propõe a identificar as atividades críticas em processos sociotécnicos complexos sob um enfoque ergonômico. Entende-se uma atividade crítica a que causa impacto ou influência significativa na segurança de processo, no desempenho operacional, saúde ocupacional, qualidade, meio ambiente e como consequência custos. A atividade crítica deve ser adequadamente gerenciada para garantir o sucesso de uma atividade, projeto, programa de uma organização.

No estudo do Processo Produtivo de Trabalho identificou-se as disfunções e regulações realizadas pelo homem, através dos estudos realizados pela área de segurança e entrevistas com os operadores da área a ser analisada. Ergonomia é uma ciência multidisciplinar que visa a compreensão das relações entre pessoas, máquinas e equipamentos em condições de trabalho. Portanto, estamos propondo uma resposta às demandas existentes enquanto análise de risco, que num sentido amplo se trata de identificar problemas e definir ações para mitigá-los (MENEZES, 2014).

Embora os praticantes da Ergonomia frequentemente trabalhem em setores econômicos, indústrias ou campos de aplicação específicos, a ciência e a prática da ergonomia não são específicas de um só domínio, conforme esquematizado na Figura 1. A ABERGO (Associação

Brasileira de Ergonomia) define que a ergonomia trata de uma ciência integradora multidisciplinar e centrada no usuário. Os problemas que a ergonomia aborda são tipicamente de natureza sistêmica; assim, a ergonomia usa uma abordagem holística de sistemas para aplicar teorias, princípios e dados de muitas disciplinas relevantes ao projeto e avaliação de tarefas, trabalhos, produtos, ambientes e sistemas (MENEZES, 2014). Entre tais conhecimentos, destacam-se algumas das ciências humanas e sociais, como a psicologia e a sociologia, além de ciências da vida como a medicina e diversas engenharias, como as de produção, controle e automação, química, entre outras. A ergonomia leva em consideração os fatores físicos, ambientais, cognitivos, coletivos e individuais, organizacionais, sociotécnicos e outros fatores relevantes, tentando antecipar riscos bem como compreender as complexas interações entre o ser humano e outros humanos, o meio ambiente, ferramentas, produtos, equipamentos e tecnologia (MENEZES e SANTOS, 2014; Hubault, 1992).

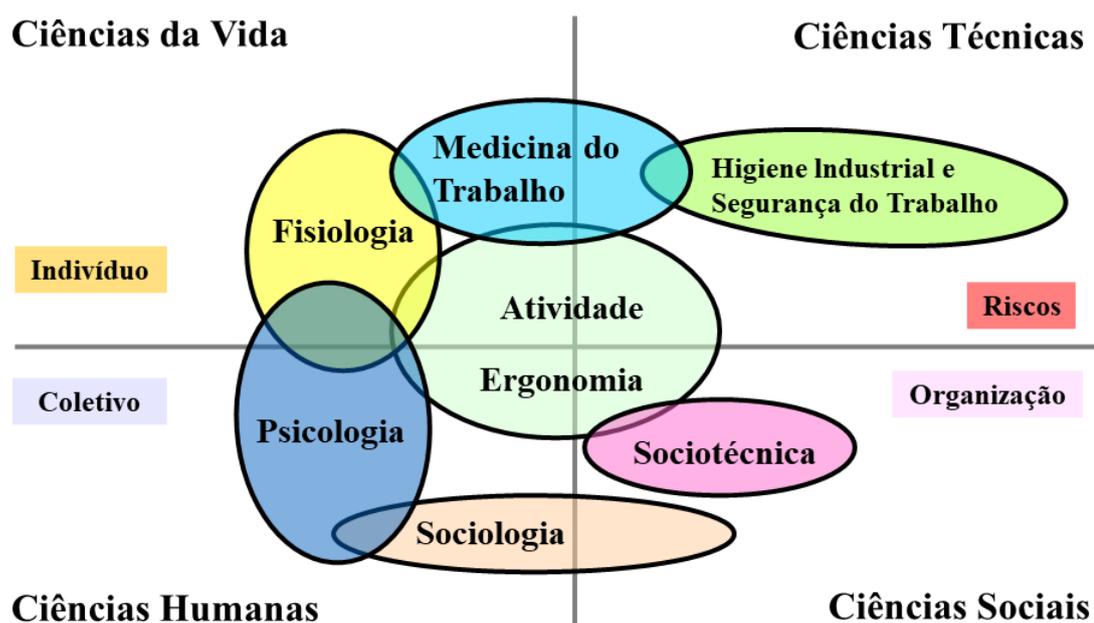


Figura 1. Interdisciplinaridade da Ergonomia, mostrando os diversos problemas abordados por esta ciência e suas interações. Adaptado de Hubault (1992).

O diagrama acima representa a interdisciplinaridade da ciência da ergonomia e as interseções entre as ciências aplicadas. Entre os diversos conhecimentos destacam-se algumas das ciências humanas e sociais, como a psicologia e a sociologia, além de ciências da vida como a medicina e diversas engenharias. Ao levar em consideração fatores físicos, ambientais, cognitivos, coletivos e individuais, organizacionais, sociotécnicos e outros fatores relevantes, a

ergonomia visa antecipar riscos bem como compreender as complexas interações entre o ser humano e outros humanos, o meio ambiente, ferramentas, produtos, equipamentos e tecnologia.

De acordo com a literatura, várias são as declarações em que há necessidade de melhorar os estudos de processos sociotécnicos complexos (JOHANSEN e RAUSAND, 2014, SANTOS *et al.* 2020; SALMON *et al.* 2022; CARVALHO *et al.* 2008).

A visão dos pesquisadores(as) mostra que há lacunas nas técnicas existentes, sendo algumas relacionadas a seguir. A **probabilidade de falha humana** como elemento de foco na Avaliação Probabilística de Segurança presentes esses artigos a seguir (PATRIARCA *et al.* 2017; PATRIARCA *et al.* 2018). A **subjetividade** da análise de contexto presentes nesses artigos a seguir (LIU *et al.* 2012; RUNTE, 2010; LEVENSON, 2004; PATRIARCA *et al.* 2017; JOHANSEN e RAUSAND, 2014). A falta da identificação das **influências do contexto** no desempenho do operador descritos nesses artigos a seguir (LIU *et al.*, 2013; OTTO *et al.*, 2017; HENDRICK, 1996; CARVALHO *et al.*, 2008; BARBER *et al.*, 2022; LIU *et al.*, 2012; VIGNAIS *et al.*, 2013; CUMMINGS *et al.*, 2010; REALYVÁSQUEZ-VARGAS *et al.* 2020; PATRIARCA *et al.*, 2017; JOHNSON, 1990; LEVESON, 2004; SALMON *et al.*, 2022; PARSONS, 2000; LEVESON, 2011; ROSEIRO *et al.*, 2018; BEDNY *et al.*, 2012). O **pensamento linear simples** presentes nesses artigos (LEVESON *et al.*, 2011) **envolvendo causa – efeito** (LIU *et al.* 2013; LIU *et al.* 2012; RUNTE, 2010; CUMMINGS *et al.*, 2010; GILAD, 1995; SANTOS *et al.*, 2020; MCATAMNEY *et al.*, 1993; LEVENSON, 2004; MISHA *et al.*, 2019; WOOD, 1986; REASON, 2000; SALMON *et al.*, 2022; LASAK *et al.*, 2014; PATRIARCA *et al.*, 2017; LEVENSON, 2011; JOHANSEN e RAUSAND. 2014; ROSEIRO *et al.*, 2018; RUNTE, 2010). A **priorização sobre o tratamento dados** sem análise detalhada do sistema sociotécnico e falta da análise das relações entre **os elementos de sistemas complexos** por fatores técnicos, humanos e organizacionais descritos nesses artigos (LIU *et al.* 2012; RUNTE, 2010; CUMMINGS *et al.* 2010; SANTOS, *et al.* 2020; LEVENSON, 2004; WILSON, 2014; LEVENSON, 2011; JOHNSON, *et al.* 2014; GREITZER, *et al.* 2005; RUNTE, 2010; PATRIARCA *et al.* 2017). A seguir algumas considerações encontradas na pesquisa.

Leveson *et al.* (2004) declararam que os métodos de avaliação de risco padronizam os fatores humanos em contextos diferentes. No entanto, eles não quantificaram o risco de maneira efetiva, pois a maioria desses métodos são focadas quase exclusivamente no potencial de erro humano e não na análise do contexto organizacional.

Ainda de acordo com [Levenson et al. \(2004\)](#), a evolução tecnológica tem sido rápida na indústria de processo e os seres humanos são naturalmente afetados. O aumento esperado na complexidade dinâmica dos sistemas sociotécnicos e as situações de segurança contribuem para acidentes, em virtude da quantidade de acréscimos de informações, uso de softwares e recursos novos com uma exigência cognitiva e habilidades aumentadas e acentuadas. De fato, sistemas complexos que possuem interações envolvendo componentes de sistemas sociotécnicos geralmente são não lineares e seu comportamento é difícil de prever ([MENEZES et al., 2021](#)).

A parte social do sistema é de vital importância, significando que não apenas a estrutura técnica, mas também toda a estrutura sociotécnica deve ser levada em consideração. Equipe, membros (gerentes, supervisores, operadores, etc.) lidam com informações heterogêneas e ocasionalmente conflitantes, bem como a pressão para atuar sob estresse de uma alta carga de trabalho ([BULLEMER, 2010](#)).

Os métodos de análise de risco, baseados em sistemas complexos e suas aplicações, tem na sua maioria o foco de avaliação de segurança nos componentes individuais separadamente. Tais métodos existentes não interpretam nem descrevem os cenários de acidentes e os cenários potenciais que permitem plena consideração da complexidade dinâmica ([MENEZES, 2014](#)).

Alguns métodos de análise de risco apresentam, em sua maioria, pensamento linear simples, do tipo causa – efeito, e não identificam as influências no desempenho do operador. Priorizam-se os tratamentos estatísticos dos dados sem interpretação detalhada do sistema sociotécnico. Falta a análise das relações entre os elementos do sistema complexos e dinâmicos através de fatores técnicos, humanos e organizacionais. Este estudo analisou informações da literatura para entender melhor as vantagens, desvantagens e limitações de ferramentas de Análise de Confiabilidade Humana (ACH) e suas aplicações ([BELL et al., 2009](#); [ALVARENGA et al., 2014](#)).

[Dallat et al. \(2019\)](#) revisaram sistematicamente as avaliações de risco, num total de 342 métodos abrangendo uma variedade de domínios críticos de segurança onde foram avaliados usando os princípios de Rasmussen de causa de acidentes ([RASMUSSEN, 1997](#)). Uma descoberta de [Dallat et al. \(2019\)](#) importante foi que na maioria das avaliações de risco existentes os métodos não são consistentes com o modelo de causa de acidente de Jens Rasmussen (1926 – 2018, engenheiro eletricista dinamarquês), sem dúvida o mais popular modelo nos círculos da ciência da segurança. Em vez disso, a maioria dos métodos de avaliação de risco se concentram nos riscos em chamadas *pontas afiadas* e em grande parte veem os acidentes como decorrentes de um processo linear ou em cadeia de eventos. Isso ignora os

riscos emergentes em outros níveis do sistema, incluindo supervisão, gestão, regulamentação e níveis de governo. Os resultados sugeriram, portanto, que a maioria dos métodos de avaliação de risco existentes podem ser inadequados para identificar perigos e analisar riscos em contextos sociotécnicos complexos.

A análise de contexto e do processo produtivo de trabalho do sistema sociotécnico de maneira mais detalhada é fundamental, a interpretação do contexto industrial, e a percepção dos usuários do processo produtivo de trabalho. A Análise Ergonômica do Trabalho detalha as atividades/funções as quais são reconhecidas e expande o conhecimento. O método FRAM (Método de Análise de Ressonância Funcional, ou *Functional Resonance Analysis Method*) utiliza as ferramentas da Análise Ergonômica do Trabalho e consegue efetuar, através de uma integração e visão geral, o estudo das dinâmicas do processo e seus acoplamentos através da teoria de sistemas. Há necessidade de um processo de validação desse estudo, que foi introduzido por meio de fatores humanos através da percepção dos usuários, operadores, nas respostas via questionários.

O FRAM é uma ferramenta de análise que reflete a engenharia de resiliência. Em termos gerais, o método FRAM visa compreender como funciona um sistema complexo, e se é impossível realizar uma avaliação de risco para gerenciá-lo de forma eficaz. Desta maneira, o método FRAM trata de uma abordagem sistemática através da descrição e representação de como uma sequência de ações ou atividades (um trabalho) observadas geralmente ocorrem. Esta representação é chamada *instanciação*. Toda função (ou atividade) é descrita por meio de um hexágono. A cada etapa do processo é representada por diversos hexágonos que estabelecem as atividades numa sequência de funções que representam os componentes de um sistema sociotécnico, conforme ilustrado na [Figura 2](#). Já os vértices representam os seguintes aspectos: entrada (*I*, ou input); saída (*O*, ou *output*); pré-condição (*P*); recursos (*R*); controle (*C*); tempo (*T*). A interação entre uma etapa e outra faz-se pela relação entre a saída ou resultados de cada etapa com os componentes da etapa seguinte. O FRAM, trata de identificar as variabilidades exógenas e endógenas do sistema.

Em linhas gerais, a simples atividade de preparar um chá pode ser descrita pelo método FRAM. A [Figura 2](#) ilustra os seguintes passos, função por função: obter chá → esquentar água → dispensar o chá na água quente → esperar por quatro minutos → acrescentar açúcar → beber o chá pronto. Nesta mesma figura foi estabelecido que obter o chá é uma pré-condição para esquentar a água; e que a saída da função referente a esquentar água vincula-se a entrada referente a dispensar o chá na água quente. Esperar por 4 minutos está associada ao tempo para

dispensar o chá e mesmo bebê-lo, enquanto acrescentar açúcar não é uma pré-condição, nem recurso, nem controle, mas pode estar associada a degustar o chá pronto.

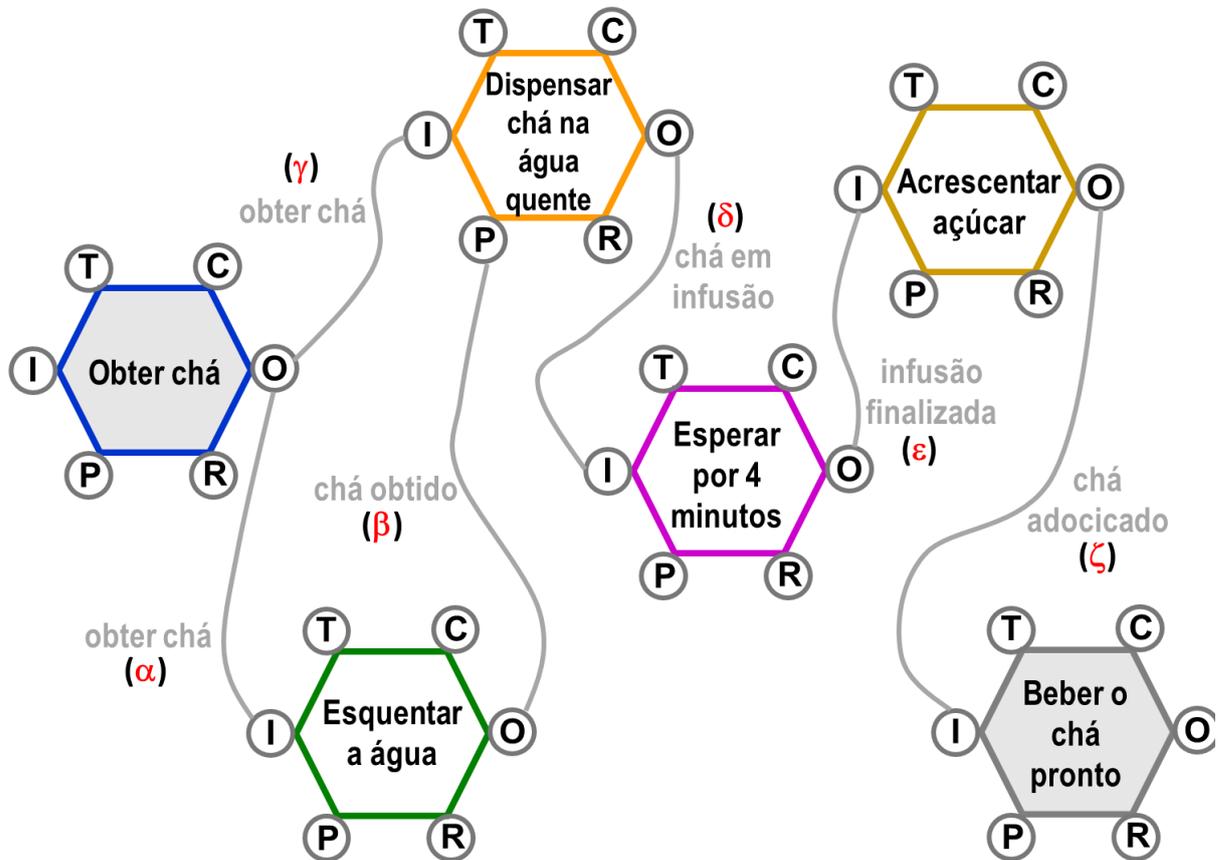


Figura 2. Exemplo FRAM do preparo de chá. Cada hexágono representa uma função ou atividade, e as siglas nos vértices representam os seguintes aspectos: entrada (*I*, ou input); saída (*O*, ou output); pré-condição (*P*); recursos (*R*); controle (*C*); tempo (*T*). As letras gregas (α , β , γ , δ , ϵ , ζ) indicam detalhes dos respectivos aspectos a serem descritos no Capítulo 2.

Pode-se ilustrar um exemplo do método FRAM aplicado nesta tese resumido em quatro etapas. Em primeiro lugar, foram realizadas observações das atividades no local de trabalho, especificamente na área de descarregamento de ácido de uma indústria química, por turno de trabalho, quantificando o tempo de cada atividade. Foi efetuado um registro fotográfico e em forma de filmes, desde o recebimento dos caminhões tanques, inspeção de cada caminhão, identificação da documentação, orientando o estacionamento e descarregamento na unidade específica, inserindo dados nos sistemas e alternando com a chegada de outros caminhões. Identificou-se a sequência, descrevendo as funções importantes do sistema e caracterizando

cada funcionamento usando as seis características básicas (chamados aspectos, ilustrados brevemente na [Figura 2](#) pelas siglas).

Os componentes das funções que constituem o modelo FRAM foram identificados e caracterizados em termos de aspectos. Os componentes entrada, saída, controle, recursos, pré-condição e tempo foram determinados para cada função na modelagem FRAM. Em seguida foi analisada cada função pelo efeito que sua saída causava nos outros componentes da próxima função. Isso significa caracterizar a variabilidade potencial das funções no modelo de FRAM, bem como a possível variabilidade real em uma ou mais implementações do modelo. Em seguida foi determinada a possibilidade de ressonância funcional com base em dependências / acoplamentos entre funções dado o seu potencial real / variabilidade. Após, desenvolveu-se recomendações sobre como monitorar e influenciar a variabilidade, quer ao ser atenuada, que pode levar a resultados indesejáveis, ou ao aumentar, podendo levar a resultados desejados.

Foi identificado que aumento da variabilidade ocorre tanto na verificação do estado do veículo quanto na precisão da documentação do material transportado, pois este apresentou um elemento cognitivo significativo associado à observação visual. O plano foi adotar medidas de controle que possibilitassem o preenchimento do *checklist* inicial via acesso visual sem registro.

Em resumo, conforme descrito detalhadamente no Capítulo 4, identificou-se que era necessário instalar um controle envolvendo um sensor de segurança na boca de visita do caminhão tanque para monitorar se estava aberto. O alarme do sensor deveria ser visual e sonoro para alertar quando a tampa da boca de visita do tanque do caminhão estaria aberta, pois a tampa devia ser removida quando o caminhão-tanque estivesse pronto para sair. Foi necessário verificar se as válvulas estavam abertas porque o produto ácido passava pela linha de descarga do tanque. Este controle é atualmente realizado pelo operador sem o auxílio de um sensor. Sugeriu-se criar um dispositivo de alarme para restringir a abertura da tampa protetora de descarga se as válvulas de restrição da passagem do ácido para a casa de bombas permanecessem abertas. Se o operador abrisse a tampa com as válvulas abertas, existia o risco de ficar coberto por ácido. Após a transferência do ácido, foi criado um procedimento adicional para permitir o acionamento da bomba em intervalos de tempo reduzidos, evitando assim resíduos de ácido na mangueira.

A proposta dessa tese associa Ergonomia, Método FRAM e Fatores Humanos, interpretando, integrando e validando o estudo analítico do risco. Um estudo de caso em planta industrial foi analisado, e identificadas as atividades críticas envolvendo problemas numa

unidade de descarregamento de ácido. A tese apresenta uma proposta metodológica que visa a identificação das atividades críticas incluindo uma visão global baseada em teoria de sistemas.

Especificamente, no problema da área de descarregamento de ácido foi feita uma abordagem ergonômica a fim de identificar o sequenciamento e tempo das tarefas do operador para fornecer dados ao FRAM. O estudo da variabilidade criado por [Hollnagel \(2012\)](#) foi aplicado, identificando quais foram os acoplamentos críticos das atividades. O processo de validação foi feito através de fatores humanos, utilizando as escolhas dos FADs (Fatores que Afetam o Desempenho humano) por uma taxonomia pré-escolhida no contexto da área industrial. Esse estudo foi realizado pelos operadores com conhecimento e treinamento em ergonomia e confiabilidade humana, baseando-se no estudo de literatura recente ([MENEZES et al., 2021](#)).

A tese é resultado da procura por atividades críticas dentro de sistemas complexos ampliando o foco de análise da segurança no funcionamento diário normal de sistema sociotécnicos.

1.1. Apresentação do Tema da Pesquisa

O tema da pesquisa consiste na identificação das atividades críticas em sistemas complexos. A aplicação da metodologia proposta foi realizada numa planta industrial de descarregamento de ácido. O presente trabalho propôs a integração da ergonomia ao desenvolvimento da modelagem FRAM, que consiste na modelagem funcional dos modos operatórios e na análise sistêmica não linear, validada por fatores humanos. A ergonomia possibilita a compreensão do comportamento humano nas interações com sistemas sociotécnicos complexos e permite transformações na atividade de trabalho que aperfeiçoa essas interações em cenários reais. O método FRAM viabiliza a produção de um modelo com as características das funções do sistema em uma propagação não linear de eventos baseado nos conceitos de variabilidade de desempenho normal e ressonância funcional.

1.2 Relevância Geral do Tema

A proposta da tese consiste num método de avaliação de segurança inovador o qual deve superar as limitações de todos os métodos disponíveis. Objetiva compreender o funcionamento normal, identificando as adaptações necessárias para assegurar o funcionamento do sistema

sociotécnico em condições de desempenho seguro. Os ajustes locais implicam que o desempenho humano é variável e como tal deve ser analisado de acordo com o contexto apresentado.

Esta tese busca uma abordagem interpretativa do sistema sociotécnico, analisando as interligações entre as funções e seus aspectos sistêmicos, identificando as variabilidades que podem conduzir o sistema a acidentes. O estudo delimita determinado processo industrial, analisando seu contexto a partir da abordagem ergonômica que fornece as informações pertinentes às atividades e funções que compõem o processo sociotécnico. Essas informações são introduzidas enquanto dados para o Visualizador do Modelo FRAM (FMV), denominadas *instanciações*. Uma instanciação do modelo utiliza informações detalhadas sobre uma situação particular ou cenário para criar uma instância ou um exemplo específico do modelo. Isso corresponde a uma organização temporal das funções que reflete a ordem em que eles irão ter lugar no cenário, dependendo de quanto existe variabilidade.

Métodos de avaliação de segurança basicamente buscam evitar eventos adversos numa relação direta entre causa e consequência, denominados por [Hollnagel \(2013\)](#) como *Safety I*. O FRAM foi proposto dentro duma concepção diversa, buscando evitar que algo de errado para garantir o processo ao buscar compreender o processo em si, integrando ambiente, condições e atores, denominado de *Safety II* ([HOLLNAGEL, 2018](#)). Tal integração envolve uma ressonância entre os diversos aspectos de um sistema sociotécnico, geralmente complexo. Enquanto recurso, o FRAM fornece uma visão geral do processo e suas interligações entre componentes, aumentando a capacidade interpretativa e uma compreensão mais abrangente do processo como um todo. A base do FRAM envolve a teoria geral dos sistemas, psicologia e automação com o objetivo de entender como tais sistemas funcionam e como a variabilidade se propaga entre suas funções, visando desenvolver resiliência. Um processo de validação, inexistente na maioria dos métodos analíticos de risco baseado em fatores humanos foi incluído nessa proposta.

1.3. Hipótese do Estudo

O estudo apresentou como hipótese uma metodologia de caráter interpretativa baseada em ergonomia e estudo de contexto, identificando as principais funções e de apoio num processo produtivo, numa análise sociotécnica. O objetivo foi avaliar e identificar no processo produtivo de trabalho as atividades críticas críticas à segurança do processo. A análise

ergonômica interpretou o contexto, o FRAM analisou as variabilidades entre os acoplamentos das funções do processo e através dos fatores humanos com a participação das percepções dos operadores, criou-se um processo de validação de resultados analisados.

Menezes *et al.* (2021) desenvolveu a formulação de análise das situações críticas em um processo sociotécnico. A integração entre ergonomia, FRAM, e fatores humanos interpreta o processo sociotécnico com detalhamento do contexto e atividades, estudo das correlações entre as etapas através da teoria de sistemas e com validação de resultados pela percepção dos usuários do processo sociotécnico. A ergonomia, através do estudo da observação da tarefa, detalha funções e atividades, fornecendo dados atualizados que são aplicados na elaboração da modelagem FRAM.

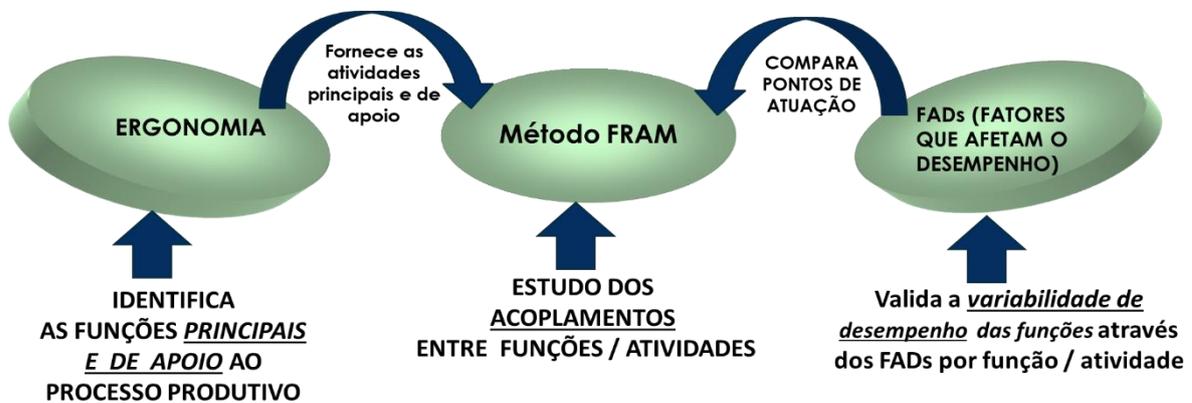


Figura 3. Resumo da proposta na tese, que vincula ergonomia, FRAM e FADs.

A Figura 3 representa um resumo da proposta da tese, integrando ergonomia, o método FRAM e Fatores Humanos através dos fatores que afetam o desempenho humano (FADs).

A ergonomia identificou no contexto, a sequência dos processos produtivos de trabalho, as funções principais e de apoio no processo produtivo. A ergonomia associou-se ao FRAM fornecendo dados das atividades principais e de apoio. Fatores humanos através dos FADs, identificou as atividades críticas escolhidas nos questionários, contendo as percepções dos operadores, e validou o estudo da variabilidade de desempenho realizado pelo FRAM.

O método FRAM recebeu essas informações a fim de estudar os acoplamentos entre funções e atividades obedecendo a sequência do processo observado no local de trabalho. O FRAM ilustra e constrói a instanciação através do software de visualização, e estimou a variabilidade de desempenho dos acoplamentos entre as funções. Esse estudo da variabilidade analisou as influencias exógenas e endógenas do contexto de trabalho analisado.

1.4. Objetivo Geral

Este estudo combinou os resultados da aplicação de dois referenciais metodológicos diferentes buscando identificar as funções críticas em uma indústria química que afetam a segurança do processo (SANTOS *et al.*, 2020; FRANÇA, 2021; LIU *et al.*, 2017 PATRIARCA *et al.*, 2016). A união entre o Método de Ressonância Funcional (FRAM) e os fatores que afetam o desempenho humano (FADs, envolveu os operadores ativos e sua participação), e foram aplicados, através de questionários e contribuiu para um processo de validação de resultados.

Desta forma, propôs uma nova abordagem para descrever e avaliar riscos e falhas em sistemas sociotécnicos complexos, considerando fatores individuais e organizacionais, questões técnicas e suas interações intrínsecas em uma planta industrial. A metodologia conseguiu analisar um sistema sociotécnico complexo e suas interações intrínsecas em um contexto de segurança envolvendo o método FRAM e se mostrou extensiva a qualquer atividade industrial o processo em bateladas.

Além da contribuição acadêmica almejada, o principal objetivo deste trabalho foi contribuir efetivamente para a melhoria da segurança e saúde em um dos locais de trabalho mais perigosos e insalubres da indústria de produção de titânio. A metodologia foi aplicada em um processo sociotécnico em bateladas e descreveu o trabalho real dos operadores, identificou as atividades críticas com um estudo da variabilidade real e ressonante associado ao desempenho dos operadores.

1.5. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos correspondem aos resultados concretos que o projeto pretende alcançar e contribuir para o alcance do objetivo geral. Os objetivos específicos dessa tese focaram na interpretação do contexto do processo, identificar as etapas e funções, estudar a população envolvida no processo sociotécnico. Interpretar as variabilidades das interligações entre componentes do processo, e incluir as percepções dos usuários na escolha das atividades críticas. Uma visão global das várias etapas do processo sociotécnico, ajuda a analisar considerando as correlações entre o componente de saída da função anterior, produto, com os componentes das funções posteriores. O estudo da variabilidade visa identificar as atividades críticas do processo sociotécnico. Comprovar os resultados com a participação dos operadores,

através da elaboração do questionário como ferramenta de consulta, objetivou validar a metodologia e diminuir a subjetividade analítica. A taxonomia dos FAD's chaves escolhidas com um trabalho construtivo, participativo, e consensual optou pelas categorias humana, tecnológica, organizacional e complexidade da tarefa. Após os resultados encontrados, esses foram comparados com os resultados da segunda etapa com uma inovação interpretativa. Os resultados obtidos na análise FRAM, foram comparados com os resultados obtidos na análise por Fatores Humanos.

A seguir os objetivos específicos descritos:

i) Interpretar e detalhar o contexto dados confiáveis das atividades principais e de apoio, para a modelagem da instanciação;

ii) Englobar e interpretar a variabilidade das correlações entre as funções e identificar as situações críticas.

iii) Incluir na análise as percepções da memória técnica dos operadores, a fim de diminuir a subjetividade dos resultados.

A metodologia ajuda a aprofundar o conhecimento do processo. Contribui para analisar e interpretar os cenários estudados mais detalhadamente.

1.6. Justificativa

Este estudo contempla os princípios da engenharia de segurança do trabalho, ergonomia, engenharia de resiliência e confiabilidade humana, que preconizam o uso da abordagem teórica aplicada na prática de uma situação real.

Esta tese irá demonstrar uma proposta com evolução significativa na identificação das atividades críticas através do método FRAM, associado a Fatores Humanos na interpretação dos resultados finais. A análise detalhada o estudo do contexto do sistema sociotécnico, nem sempre encontrado nos diversos métodos de análise de risco. A análise das relações entre os componentes dos sistemas complexos e dinâmicos por fatores técnicos, humanos e organizacionais ofereceu uma resposta coerente e com validação dos resultados.

No cenário de um acidente um modelo FRAM descreve os acoplamentos específicos em uma determinada situação ou num cenário particular, analisando o contexto específico e real, na medida em que este é interpretado. Numa avaliação de risco, em contextos específicos são consideradas as expectativas de como o evento pode acontecer ([HOLLNAGEL, 2012](#)). O FRAM identifica a dinâmica funcional de acoplamentos (ressonância) que deverão

desempenhar um papel em um evento ou em uma situação particular. As avaliações de risco tradicionais, predominam o pensamento linear simples tipo causa-efeito, e o método FRAM trabalha com a interpretação identificando os acoplamentos e reconhecendo a variabilidade no trabalho diário.

O método FRAM permitiu uma orientação embasada em aspectos importantes da ergonomia e segurança do trabalho na análise dos processos produtivos. Deve-se notar que os acidentes ocorrem como resultado de interações entre componentes, não apenas de falhas entre componentes. A importante contribuição dessa tese foi mostrar a aplicação na indústria química na área de descarga de ácidos, um processo em processo que depende muito do julgamento do operador na sua tomada de decisão. O processo de validação proposto, através de Fatores Humanos, preencheu duas lacunas científicas. A subjetividade da análise de contexto e a validação dos resultados através da percepção, memória técnica baseada na vivência operacional, contribuindo significativamente para a tomada de decisão na aplicação de medidas de controle (MENEZES *et al.*, 2021).

1.7. Originalidade da Tese: Inovação, Contribuições e Limitações

As contribuições e inovações da presente tese, focou na interpretação. A integração da Ergonomia, Método FRAM e FADs na metodologia assegurou a identificação das atividades críticas que impactam na segurança do processo, com base científica e validação.

O FRAM utiliza ferramentas da análise ergonômica como observação das atividades no local de trabalho para elaboração das instâncias ou representações dos processos sociotécnicos analisados. Faltava um processo de validação da análise, ausente no FRAM e que a ergonomia preconiza. A participação dos operadores e usuários do processo sociotécnico com suas percepções do processo eliminam um pouco da subjetividade. A escolha da influência dos FADs por meio de classificações (*i.e.*, taxonomia), na análise do contexto industrial pelos operadores, identificou as atividades consideradas críticas e ajudou na comparação com os resultados obtidos no FRAM, conforme descrito no Capítulo 4.

As contribuições presentes no estudo encontram-se detalhadas nos próximos capítulos. Em especial, identificou-se que existe uma diferença entre a variabilidade real nos processos em bateladas e automatizados nos acoplamentos funcionais entre alguns componentes. Verificou-se também que o estudo do sequenciamento do sistema produtivo é importante nos processos em bateladas pois pode eliminar atividades / funções.

Nesse estudo identificamos diferenças importantes presentes nos processos caracterizados pela predominância da gestão humana no controle do sistema operacional. A intervenção humana é comum na implementação de mudanças e adaptações de eventos, ajustando atividades fora do padrão e corrigindo eventuais problemas operacionais (MENEZES *et al.*, 2021).

Esta tese focou e detalhou as diversas atividades industriais presentes na unidade de descarregamento de ácido da indústria de produção de titânio. O objetivo principal foi desenvolver uma metodologia com uma nova abordagem para avaliar segurança de processo em sistemas sociotécnicos complexos, considerando fatores tecnológicos, organizacionais e humanos. Como estudo preliminar, pesquisou-se as questões técnicas e suas interações intrínsecas no ambiente de trabalho analisado. Alguns estudos como metodologias de análise de risco realizados pela segurança do trabalho da indústria, foram analisados.

Outras abordagens e aprofundamentos sobre questões específicas que possam surgir nesta tese além da integração entre FRAM e fatores humanos, que possam contribuir para o desenvolvimento da comunidade científica e acadêmica da indústria brasileira, serão identificadas e sugeridas como oportunidades para futuros trabalhos.

1.8. Estrutura da Tese

O texto desta tese apresenta uma estrutura em seis capítulos e três apêndices, conforme descrito a seguir. O primeiro capítulo introduz a tese, ressaltando sua importância e justificando a motivação para a contribuição científica pretendida, através da apresentação dos objetivos traçados. O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica e a fundamentação teórica. O Capítulo 3 descreve a metodologia a ser empregada e suas principais etapas. O Capítulo 4 apresenta o estudo de caso da indústria química escolhida para validar o método desenvolvido. O Capítulo 5 trata da apresentação e discussão dos resultados. O Capítulo 6 finaliza por meio de algumas recomendações de trabalhos futuros. Em seguida são apresentadas as referências bibliográficas e apêndices.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir apresentamos um detalhamento da fundamentação teórica utilizada neste trabalho. Para tanto, é necessário definir e esclarecer itens como sistemas sociotécnicos, resiliência, ergonomia, análise ergonômica do trabalho e método FRAM, entre outros, para melhor compreensão do problema abordado nesta tese.

2.1. Sistemas Sociotécnicos Complexos

Uma atividade é considerada complexa se houver pouco conhecimento sobre suas consequências, mesmo se existir um grande conhecimento sobre o assunto, incluindo as consequências de suas subatividades. Usamos o termo “atividade” em vez de “sistema” para poder estabelecer uma teoria com terminologia simples e consistente, vinculando risco e complexidade (MENEZES, 2014).

Por exemplo, esta definição refere-se explicitamente a “consequências”, que é um componente-chave do risco e suas caracterizações. No entanto, na prática, geralmente nos referimos a um sistema (que provém do grego, significando um todo feito de partes, ou conjunto), e “atividade”, que é entendida como a atividade gerada pelo sistema. Nesta definição, o conhecimento é referido em diferentes locais, relacionados ao nível geral de atividade (sistema) e ao nível de subatividade (componente). Da mesma maneira, podemos definir risco e desempenho em diferentes níveis. O gerenciamento da resiliência, detalhado no próximo item, pode ser uma estratégia adaptativa de gerenciar riscos, pois os sistemas complexos se comportam de maneira dinâmica (MENEZES, 2014).

Há necessidade de abordagens adaptativas e dinâmicas porque emergência e adaptabilidade caracterizam sistemas complexos (JENSEN e AVEN, 2018). Johansen e Rausand (2014) estabeleceram a seguinte definição: “complexidade é um reconhecimento de limitações no entendimento do seguinte: 1) O sistema sociotécnico em todos os seus contextos operacionais; 2) Como o risco pode ser avaliado, com base no conhecimento disponível e nas suposições sobre os elementos do sistema? Um elemento relevante aqui é um termo amplo que se refere a entradas individuais, componentes, processos, riscos, eventos, condições e assim por diante”. Essa definição fornece um vínculo direto entre complexidade e o conceito de risco. Um aspecto relevante e de interesse aqui refere-se ao modo como as limitações na compreensão da

avaliação do risco com base no conhecimento dos elementos do sistema e nas suposições sobre esses elementos (JOHANSEN e RAUSAND, 2014).

As principais características e propriedades associadas a sistemas complexos são hierárquicas, não lineares, vinculadas a emergência ou adaptabilidade (SIMON, 1962; KRÖGER *et al.*, 2011; SUNDSTRÖM *et al.*, 2012; LADYMAN *et al.*, 2012). A complexidade pode ser vista como uma propriedade inerente ao sistema ou atividade a ser estudada (JOHANSEN e RAUSAND, 2014; AVEN *et al.*, 2004).

A falta de linearidade nos sistemas complexos significa que os “elos causais” do sistema formam algo mais complicado do que uma única cadeia, por exemplo, ciclos de *feedback* (MACKAY, 2008). Um desses métodos para a identificação de ameaças perigosas de sistemas complexos é o método de análise de ressonância funcional (FRAM), introduzido por Hollnagel (2004), e demonstrado com maior detalhe adiante. A ideia principal do método é focar nas funções necessárias para o sistema funcionar como pretendido, em vez de meras componentes de um sistema. Cada função é acoplada em uma rede usando seis aspectos definidos: Entrada, Saída, Pré-condição, Recurso, Controle e Tempo, conforme brevemente ilustrado na Figura 2, e descrito com maior detalhe adiante. Tendo construído a rede, o(a) analista aborda a variabilidade em cada função e analisa como a variabilidade ressoa através da rede. O método requer alguma habilidade e competência para condução da análise. Os métodos tradicionais ainda dominam, apesar de suas fraquezas na modelagem de sistemas complexos. O método FRAM auxilia na visualização e entendimento do comportamento do sistema, modelando o sistema como um todo e oferecendo suporte na análise preventiva.

Jensen e Aven (2018) concluíram que um dos principais desafios da complexidade em um contexto de avaliação e gerenciamento de riscos é o conhecimento no nível geral da atividade (sistema), mesmo que tenhamos um forte conhecimento no nível da subatividade (subsistema). A avaliação de riscos e o gerenciamento de sistemas e atividades complexos exigem o reconhecimento da necessidade de novas abordagens e métodos, em comparação com a prática tradicional de avaliação de riscos técnicos, usando modelos como árvores de eventos e árvores de falhas.

A tradicional visão da segurança, chamada *Safety I*, é definida como a falta de acidentes e incidentes, tratando como inaceitável a possibilidade de risco. Logo, o foco da pesquisa é no gerenciamento do sistema operacional inseguro mais que na operação segura. Contrastando com a visão tradicional, a engenharia de resiliência mantém a mesma razão nas coisas que dão errado e nas coisas que dão certo. Isso está sendo chamado de *Safety II*, que considera a

habilidade do operador vivenciar uma dinâmica de trabalho sob variadas condições. Para entendermos o funcionamento diário, é necessário entendermos o desempenho de segurança de uma organização.

Conforme sugerido por [Hollnagel et al. \(2007\)](#), [Carayon et al. \(2015\)](#), [Yang et al. \(2017\)](#) e [Flach et al. \(2015\)](#), a segurança é uma propriedade emergente dos sistemas sociotécnicos, surgindo nas interações entre componentes, subsistemas, *software*, organizações e comportamentos humanos.

As organizações podem estar melhor preparadas para acidentes e ocorrências acidentais caso sejam capazes de analisar a estrutura causal e dinâmica por trás de tais eventos, bem como aprender com eles, o que torna mais fácil compreender os sinais de alerta (eventos e comportamentos) por acidentes e erros. Tipos anteriores de modelos análise de acidentes (sequenciais e epidemiológicos) viam a segurança de maneira reativa, em vez de proativa, concentrando-se principalmente em “aprender com os eventos” retrospectivamente na avaliação proativa da segurança ([HOLLNAGEL et al. 2007](#)). Esta estratégia do tipo “aprender com eventos” obviamente apontou várias falhas em um grande número de acidentes passados, o que enfatizou ainda mais a necessidade de abordar a segurança de maneira proativa e de se concentrar na organização, como processos envolvidos no “gerenciamento de segurança”. O FRAM foi introduzido pelo psicólogo dinamarquês Erik Hollnagel (*n.* 1941) para capturar fenômenos emergentes em sistemas não lineares complexos ([HOLLNAGEL e GOTEMAN, 2004](#)). O conceito por trás desse método de análise de risco é que acidentes ocorrem devido a ressonâncias imprevistas dentro do sistema, e é adequado para prevenção de acidentes. Em linhas gerais, o método reconhece o fato de que a segurança é uma propriedade emergente do sistema.

2.2. Engenharia de Resiliência

A Engenharia de Resiliência introduz um novo paradigma para gerenciar a segurança de sistemas, especialmente os sistemas complexos, tendo como foco o entendimento e descrição das características das funções do sistema e sua variabilidade ([CARVALHO, 2011](#)).

[Sevilha et al. \(2006\)](#) definiram uma organização resiliente como “aquela que ainda é capaz de atingir seus objetivos principais em face da adversidade. Isso significa não apenas reduzir o tamanho e a frequência das crises (vulnerabilidade), mas também melhorar a capacidade e a velocidade da organização para gerenciar crises efetivamente (capacidade

adaptativa). Para gerenciar efetivamente crises, as organizações também precisam reconhecer e evoluir em resposta ao complexo sistema dentro do qual a organização opera (conscientização da situação) e buscar novas oportunidades, mesmo em tempos de crise”. [Sevilha et al. \(2006\)](#) ainda sugeriram que a resiliência de uma organização pode ser medida pela “severidade e duração do impacto no desempenho”.

O funcionamento de alguns sistemas industriais é gerenciado por seres humanos, os quais tem a capacidade de ajustar o seu comportamento para atender as demandas de desempenho. A necessidade de ajustes deve-se à natureza dos sistemas industriais e implica que o desempenho tende a ser variável. A variabilidade tem de ser entendida como a expressão da influência de fatores sistêmicos sobre o desempenho normal. As quatro razões (fisiológicas, psicológicas, sociais e contextuais) das variabilidades de desempenho são obviamente importantes, e responsáveis pelas melhorias de segurança. Através da metodologia apresentada na tese foi demonstrado de maneira prática a engenharia de resiliência sendo aplicada.

O método de análise de ressonância funcional (FRAM) de [Hollnagel \(2004\)](#) propõe uma metodologia para identificar e avaliar a variabilidade de desempenho. Baseado em uma modelagem funcional, o FRAM partilha com a engenharia de resiliência suposições sobre os complexos sistemas sociotécnicos não especificados e reconhece a necessidade de ajustes locais.

Particularmente, [Hollnagel \(2006\)](#) sugeriu que a resiliência trata “da capacidade intrínseca de uma organização (sistema) de se manter ou recuperar-se dinamicamente de modo estável, o que lhe permite continuar as operações após um grande acidente e / ou na presença de estresse contínuo”. Acrescentou que a resiliência é a “capacidade de um sistema ou organização para reagir e recuperar-se de distúrbios em um estágio inicial, com um efeito mínimo na estabilidade dinâmica”.

[Woods \(2006\)](#) foi além, sugerindo que a resiliência não se trata simplesmente a capacidade de adaptar (porque todos os sistemas são capazes de se adaptar até certo ponto), mas a capacidade de lidar com eventos que não se enquadram nos modelos e mecanismos de adaptação predefinidos de um sistema. [Leveson et al. \(2006\)](#) definiram que “resiliência é a capacidade dos sistemas de impedir ou se adaptar às mudanças nas condições para manter (controlar) uma propriedade do sistema”. Argumentaram que um sistema resiliente é aquele em que os controles estão em vigor e funcionam adequadamente, para impedir que os riscos aumentem à medida que o sistema e o ambiente em que operam muda com o tempo. [McDonald \(2006\)](#) ofereceu uma “definição provisória de resiliência”, sugerindo que representa a

capacidade de antecipar e gerenciar riscos por meio de adaptação de ações, sistemas e processos, de forma a garantir que possa desempenhar suas funções “em um relacionamento estável e eficaz com o meio ambiente”.

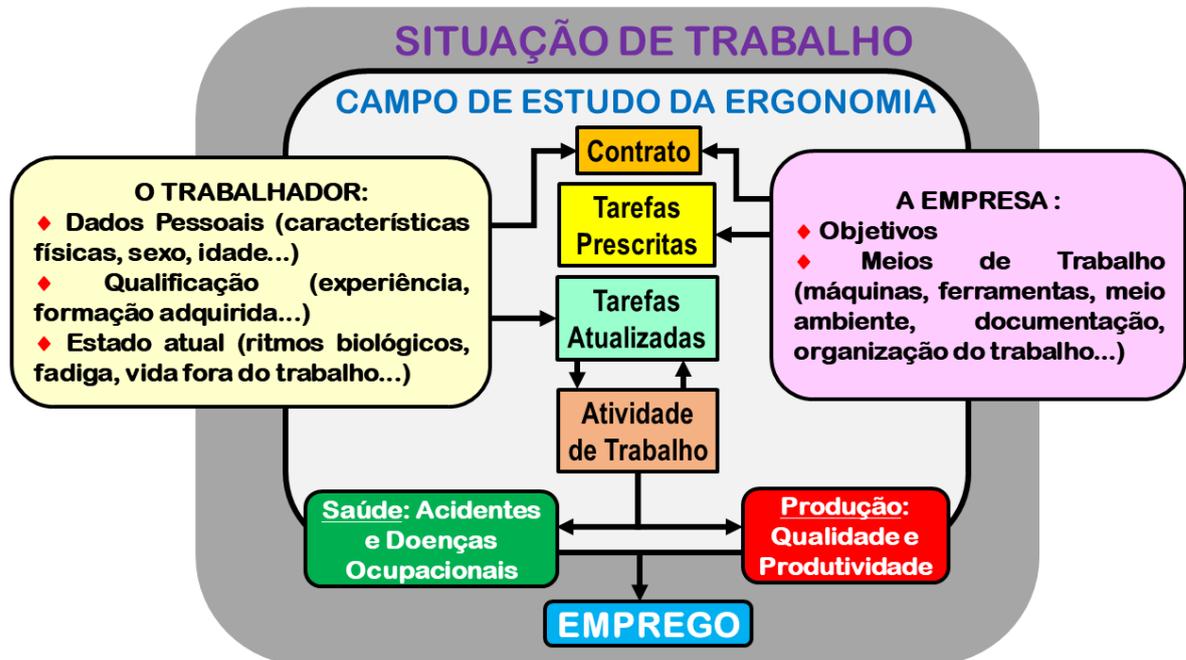
Rasmussen (1997) defendeu que “não se deve esquecer que o sucesso comercial em um ambiente competitivo implica a exploração do benefício de operar nos limites da prática habitual e aceita. Aproximando-se e explorando os limites normais e funcionalmente aceitáveis da prática estabelecida durante situações críticas implicam necessariamente no risco de ultrapassar os limites de práticas seguras”. A implicação clara da observação de Rasmussen é que os esforços de segurança geralmente tendem a simplesmente seguir os esforços de produção.

2.3. Ergonomia

A ergonomia é definida “como o conjunto dos conhecimentos científicos relativos ao homem e necessários para a concepção de ferramentas, máquinas e dispositivos que possam ser utilizados com o máximo de conforto, de segurança e eficácia” (WISNER, 1993). A ergonomia pode ser considerada um conjunto de conhecimentos interdisciplinares que conserva o objetivo principal, qual seja, a concepção de situações e instrumentos de trabalho de acordo com o desempenho do homem, então ela é diretamente identificável. O objetivo das pesquisas em ergonomia trata do estudo das trocas regulamentadas entre o ambiente profissional e o trabalhador (MENEZES, 2014). A ergonomia situa-se num campo fronteiro entre as ciências humanas, biológicas e exatas; produz seus próprios resultados sobre as condições do desempenho do homem em situação de trabalho; está voltada para a concepção e/ou transformação dessas situações, considerando todas as características das pessoas em atividade, conforme indicado na Figura 4.

Uma intervenção ergonômica visa transformar o trabalho, contribuindo para o projeto de situações que não afetem a saúde das pessoas, e nas quais possam exercer suas competências tanto individuais quanto coletivas e encontrar possibilidades de valorização destas capacidades. Estes dois objetivos podem ser complementares se a análise tratar das interações entre as duas lógicas envolvidas: uma centrada sobre o social e outra centrada sobre a produção. Importante definir a delimitação, mas, sobretudo a maneira como se define o objeto para a ação e os critérios aos quais nos referimos.

A [Figura 4](#) apresenta o campo de estudo da ergonomia, adaptado de [Gontijo e Motter \(2012\)](#). A situação de trabalho é dividida entre a empresa e o trabalhador. Há observâncias de contrato, tarefas prescritas e atualizadas, além da atividade de trabalho. Tal ciclo leva em conta aspectos de saúde e produção.



[Figura 4](#): Campo de estudo da ergonomia, onde a situação de trabalho é dividida entre a empresa e o trabalhador. Há observâncias de contrato, tarefas prescritas e atualizadas, além da atividade de trabalho. Tal ciclo leva em conta aspectos de saúde e produção. Adaptado de [Gontijo e Motter \(2012\)](#).

2.3.1. Análise Ergonômica do Trabalho

A Análise Ergonômica do Trabalho (AET) pretende gerar um diagnóstico claro para conduzir e orientar modificações visando a melhoria das condições de trabalho nos pontos críticos que foram evidenciados. A NR-17 (Norma Regulamentadora 17) apresenta as principais etapas da AET que devem ser satisfeitas (e seguidas de comentários):

- Identificação da Demanda. Coletar informações preliminares para o conhecimento da demanda e do contexto de uma forma geral.
- Análise Global da Empresa/Contexto de Trabalho. Conhecer o funcionamento global da empresa (organograma, principais processos, produtos, etc.).

- Análise da População de Trabalhadores(as). Conhecer os atores envolvidos neste contexto. Informações como sexo, idade, função, tempo de empresa e tempo na função, jornada de trabalho, etc., que podem auxiliar no desenvolvimento do estudo.

- Definição das Situações de Trabalho a Analisar. Baseado na demanda inicial, as situações de trabalho a analisar são definidas.

- Descrição das Tarefas Realizadas pelos trabalhadores, com o objetivo de se conhecer quais são as tarefas prescritas e realizar um levantamento dos procedimentos existentes. A tarefa corresponde a um modo de apreensão concreta do trabalho, que tem como objetivo reduzir ao máximo o trabalho improdutivo. Uma boa gestão significa otimizar o trabalho produtivo.

A tarefa corresponde, de um lado, a um conjunto de objetivos designados ao trabalhador(a), e, de outro lado, a um conjunto de prescrições definidas externamente ao trabalho, a fim de atingir estes objetivos. A tarefa é o procedimento padrão descritivo que está presente nos manuais operacionais, mas sofrerá modificações a depender do contexto e *modus operandi* dos profissionais executantes.

- Estabelecimento de um pré-diagnóstico. Diante das informações coletadas nas fases anteriores, é possível estabelecer um roteiro, que consiste numa síntese dos problemas encontrados.

- Observação Sistemática da Atividade. Esta etapa ocorre a partir de um recorte das ações dos trabalhadores, utilizando a forma de observação participativa que consiste em observar e ao mesmo tempo interagir com o observado, procurando entender as atividades que estão sendo realizadas, como por exemplo: o quê, como, para quê, em quais condições, etc. Podemos dizer que a observação sistemática é uma investigação que tem como objetivo descobrir as causas que provocam os problemas listados no pré-diagnóstico, mas não limitante a estes, pois no decorrer desta etapa novas questões podem surgir e contribuir para o andamento do estudo (HEBEDA e SANTOS, 2012).

- Recomendações/Diagnóstico. Os frutos colhidos durante a construção de toda AET possibilitam estabelecer um diagnóstico, relacionado a atividade desenvolvida pelos trabalhadores.

- Validação do Diagnóstico. Nesta etapa procura-se validar junto aos atores envolvidos todas as representações levantadas na AET, a fim de se garantir a pertinência dos resultados.

- Projeto das Modificações. Com base na compreensão da atividade dos trabalhadores, é possível propor medidas para transformação da situação atual de atividades, objetivando melhorar as condições de trabalho.

Wisner (1993) apresentou um resumo das fases que compõem aspectos relevantes da análise ergonômica do trabalho: análise da demanda, exame das condições técnicas, econômicas e sociais, análise das atividades como elemento central do estudo, diagnóstico, recomendações, simulação do trabalho com as modificações propostas, e uma avaliação do trabalho na nova situação.

A Figura 5 apresenta uma representação do estudo da Análise Ergonômica do Trabalho, adaptada de Gontijo e Motter (2012). Ela envolve a análise da demanda, da tarefa e das atividades ao propor dados e hipóteses em cada situação. Ao fim da análise das atividades é efetuado um diagnóstico que leva a recomendações ergonômicas.

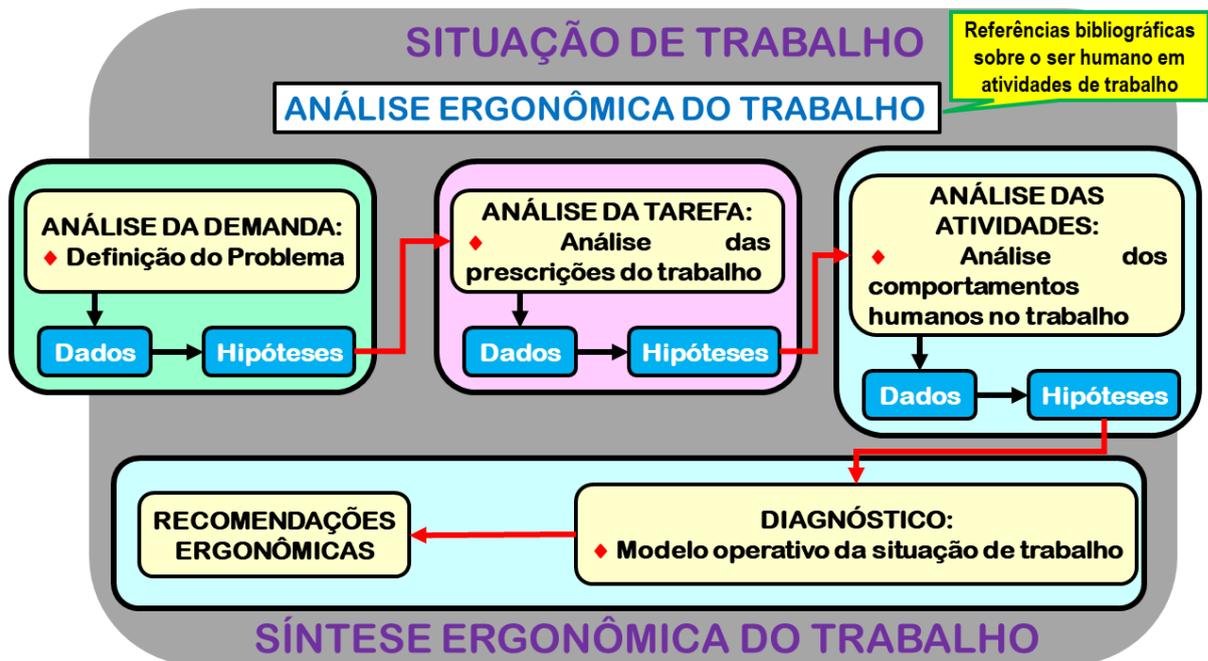


Figura 5. A AET apresenta três etapas básicas, envolvendo a análise da demanda, da tarefa e das atividades ao propor dados e hipóteses em cada situação. Ao fim da análise das atividades é efetuado um diagnóstico que leva a recomendações ergonômicas. Adaptado de Gontijo e Motter (2012).

Setti (2002) explicou as principais etapas da AET, ilustrando e complementando a normas citada acima, a saber:

Etapa 1: Indicar o local/área/setor onde há uma demanda a ser analisada.

Etapa 2: Conversar com o gerente e/ou responsável do local/área/setor onde o trabalho será feito. Identificar a demanda do gerente. Entrevistar este responsável e anotar o que ele considera como problemático na área em questão. Transcrever esta entrevista.

Etapa 3: Análise da atividade na situação escolhida, observar o operador realizando sua tarefa: isto prepara o olhar do(a) ergonomista. Ficar observando o operador, o que ele faz, como faz, como se desloca, descrever as tarefas dos operadores: o que está prescrito ao operador? Quais são os objetivos dados ao operador? O que a empresa espera dele? Há uma descrição disponível daquela tarefa/cargo? Descrever a atividade do operador: Como o operador realiza sua tarefa?

Etapa 4: descrever o posto de trabalho do operador. Apresentar um esboço, um desenho técnico do posto ou uma foto.

Etapa 5: descrever as condições ambientais onde a tarefa é realizada.

Etapa 6: Preparar uma entrevista ou questionário para aplicar aos trabalhadores do local escolhido e que realizam a tarefa que está sendo observada. Identificar a demanda do operador. As observações e a análise da tarefa servem para preparar este questionário e/ou entrevista.

Etapa 7: A parte central e original da AET é a análise das atividades ([WISNER, 1993](#)). O estudo dos comportamentos do operador através da observação e acompanhamento no seu dia embasará o estudo de tempos e movimentos. As ferramentas para registro podem ser feitas por desenhos, croquis, fotografias, filmagens das situações reais de trabalho. Observar e registrar os comportamentos apresentam limites técnicos.

Etapa 8: A auto confrontação é uma técnica particular utilizada pelos especialistas em AET que complementa a observação dos comportamentos com uma abordagem diferente. De acordo com [Setti \(2002\)](#), “esta técnica permite que o(a) ergonomista compreenda as atividades cognitivas que estão subjacentes aos levantamentos realizados durante a observação das atividades.

Segundo [Santos et al. \(1997\)](#), as seguintes informações e observáveis são de vital importância para análise ergonômica do trabalho, complementando assim os aspectos da norma e as pontuações de [Setti \(2002\)](#):

- Sistemas/Equipamentos: Princípios de funcionamento (mecânico, elétrico, hidráulico, pneumático, eletrônico), dimensões características (croqui, foto, fluxograma de produção), botoeiras, interfaces.

- Informações referentes às ações realizadas: As ações imprevistas ou não programadas; as principais posturas de trabalho assumidas pelo operador (ou operadores); os principais deslocamentos realizados pelo operador; as principais regulações ao nível do homem, do posto, do sistema.

- Dados referentes ao ambiente de trabalho: o espaço e os locais de trabalho (dados antropométricos e biomecânicos); o ambiente térmico (ruído, temperatura, vibração).

- Dados referentes aos órgãos sensoriais: campo visual do operador; riscos de ofuscamento (fontes de informação de alto contraste); acuidade visual; sensibilidade às diferenças de cores; acuidade auditiva; problemas de audição (notadamente em razão de uma intensidade sonora muito elevada).

- Dados a serem levantados referentes aos dispositivos: número e variedade de comandos; posição, distância relativa dos sinais e dos comandos associados; intervalo entre o aparecimento do sinal e o início da ação; rapidez e frequência das ações realizadas pelo operador; nível de correspondência entre a forma dos comandos e suas funções; nível de coerência no sentido dos movimentos de comandos; posição dos comandos em relação às zonas de alcance das mãos e dos pés;

- Dados a serem levantados referentes às características do operador: posturas; exigências antropométricas; posição dos membros do operador envolvidos pelos diferentes comandos da máquina; ações simultâneas das mãos ou dos pés; nível de conformidade dos deslocamentos dos comandos em relação aos estereótipos dos operadores; nível de compatibilidade entre o efeito de uma ação sobre comando, percebido (ou imaginado) pelo operador; número de informações a serem memorizadas.

2.3.2. Importância do Tempo e Conhecimento do Operador da Área de Trabalho na Análise Ergonômica

[Hollnagell \(2014\)](#) definiu como o aspecto do tempo contribui para a identificação das várias maneiras pelas quais uma atividade realizada pode ser afetada. O tempo, ou melhor, os relacionamentos temporais, pode ser visto como uma forma de controle, como quando o tempo representa condições de sequenciamento. [Guérin et al. \(2006\)](#) trataram de dois tipos de restrições que afetam o trabalho dentro de uma organização: variabilidade na produção e no tempo. A produção é afetada pela demanda e a demanda varia com alguma regularidade ao longo do tempo.

O problema enfrentado pela ergonomia é que a coleta de instruções superiores e inferiores ocorrem em tempo real, forçando os trabalhadores a tentar descobrir o que funciona e o que não funciona. O papel positivo dos operadores na confiabilidade dos sistemas pode ser claramente identificado quando eles adaptam os procedimentos planejados ao contexto real de trabalho, ou

quando desenvolvem procedimentos originais, ao lidar com situações desconhecidas, em tempo hábil para manter operação e segura e eficiente. A atividade de controle em um setor de processo contínuo não deixa dúvidas sobre a importância dos operadores para a confiabilidade desses sistemas. Eles tomam as decisões finais que levam à paralisação da fábrica ou a uma posição segura diante de distúrbios. É importante chamar a atenção para o fato de que a organização real do trabalho pode ter orientações diferentes, dependendo do coletivo que o produz. Após alguns anos, na medida em que as plantas construídas a partir do mesmo processo técnico divergem significativamente, basicamente devido à degradação da operação, ao uso inadequado do equipamento e aos incidentes que ocorrem, causam diferenças significativas no tempo de resposta do processo, o ponto de que eles não são mais idênticos, mesmo no plano material (WISNER, 1985). A resposta parece estar na capacidade humana de fazer ajustes para preencher a lacuna entre o que precisa ser feito e o que pode ser feito com os recursos disponíveis. De fato, a nova visão sugere que o trabalho é o que acontece quando os humanos fazem esses ajustes.

Ajustes são mudanças no fluxo natural do trabalho para evitar uma situação considerada indesejável, para compensar uma falta temporária de recursos, equipamentos e tempo, ou para manter ou restaurar o controle sobre a operação de um sistema sociotécnico. Os ajustes que eles fazem respondem a uma compreensão de um contexto local limitado (WOODS e COOK, 2003). Os ajustes são necessários porque sistemas complexos não podem ser totalmente descritos. Paradoxalmente, eles contribuem para a dificuldade em descrever sistemas complexos. Nesse sentido, os ajustes têm a característica de serem aproximações com base nos meios disponíveis (tempo, recursos, informações etc.) (RUNTE, 2010). A quantificação do tempo e o uso dos questionários, com a participação dos operadores, oferecendo propostas de intervenções para melhorar o processo, com informações reais de sua experiência operacional, direcionam a análise ergonômica para medidas de controle eficazes e eficientes.

2.4. Método de Análise de Ressonância Funcional (FRAM)

Por meio do FRAM é possível entender e analisar um evento passado ou futuro, ou como algo aconteceu (um evento), para avaliar como algo pode ocorrer (um evento), ou para avaliar o impacto das mudanças/melhorias (projeto). O FRAM pode, portanto, ser usado como parte da análise de eventos, como parte da avaliação de risco, ou como parte do processo de um

projeto, mas, estritamente falando, não se trata de um mero método de análise de acidentes, ou de avaliação de risco ou ainda de projeto (RAE *et al.*, 2014).

Este método é baseado em quatro princípios, conforme descrito por Hollnagel (2012): *i) Equivalência entre fracassos e sucessos*. Falhas e acertos têm a mesma origem, ou seja, envolvem a variabilidade do trabalho cotidiano. Este último permite que ambas as coisas dêem certo, funcionando como deveriam, e as coisas dão errado. *ii) Princípio dos reajustes aproximados*. As pessoas enquanto indivíduos ou como grupo organizado se ajustam ao seu desempenho diário para corresponder às condições de trabalho parcialmente intratáveis e sob especificações de sistemas Sociotécnicos. *iii) Princípio da emergência*. Nem sempre é possível identificar as causas de cada evento de segurança específico. Muitos eventos parecem ser emergentes e não resultantes de uma combinação específica de condições fixas. Alguns eventos surgem devido à combinação de condições de tempo e espaço, que podem ser transitórias, não deixando rastros. *iv) Ressonância funcional*. Esta ressonância não é completamente estocástica, porque a variabilidade do sinal não é completamente aleatória, mas está sujeita a certas regularidades, ou seja, atalhos ou heurísticas reconhecíveis, que caracterizam diferentes tipos de função (MENEZES *et al.*, 2021).

As principais etapas de uma análise FRAM são: *i) Definir o objetivo da modelagem e descrever a situação a Ser analisada*. *ii) Identificar as funções de fundo ou ainda de primeiro plano (FF, *foreground* ou funções principais) do processo, e caracterizá-las de acordo com entrada, saída, pré-condições, recursos, tempo e controle*. *iii) Caracterização da variabilidade real/potencial das funções no modelo FRAM, bem como a possível variabilidade real em uma ou mais Instanciações*. *iv) Considerar as variabilidades ditas normais (ou esperadas) e aquelas eventualmente de pior caso*. *v) Definir as ressonâncias funcionais com base em acoplamentos potenciais/reais Entre funções*. *vi) Desenvolver recomendações sobre como monitorar e gerenciar a variabilidade, seja atenuando a variabilidade que pode levar a resultados indesejáveis, seja aumentando a variabilidade, que pode levar a resultados desejados* (HOLLNAGEL, 2017). Para construir um modelo FRAM é necessário iniciar com a identificação dos tipos de funções tendo como base as seguintes classificações: tecnologia, humano ou organizacional.

O método de análise de ressonância funcional está focado na identificação e redução de riscos emergentes. O modelo FRAM pode ser utilizado para diversos tipos de análises, tanto retrospectivas quanto prospectivas, que consiste em uma série de cinco fases e requer a identificação e descrição das funções do sistema para chegar a um modelo e sua instanciação.

A análise concentra-se na variabilidade de saída das funções, uma vez que se o desempenho de uma função for variável sem aparecer no aspecto de saída, a variabilidade não é considerada tão importante. No entanto, se a saída de uma função é variável, a variabilidade da função é de interesse, pois é ela que determina as características e, portanto, a qualidade da saída (HOLLNAGEL, 2012).

A instanciação do modelo utiliza informações detalhadas sobre o cenário e cria uma instância ou um exemplo específico do modelo. Isso corresponde a uma organização temporal das funções ou atividades que reflete a ordem em que serão colocadas no cenário, dependendo da quantidade de variabilidade. No FRAM, as funções são descritas por meio de seis aspectos, a saber: entrada, saída, pré-condição, recurso, controle e tempo, conforme apresentado na [Figura 2](#). A regra geral do FRAM é que um aspecto deve ser descrito, se necessário ou adequado pela equipe de análise, sempre que houver informações ou experiência suficientes para fazê-lo.

Os acoplamentos entre funções são descritos em um modelo FRAM, e as dependências são consequência dos atributos dos aspectos compartilhados, chamados de *acoplamentos potenciais*. Isso ocorre porque um modelo FRAM descreve as relações potenciais ou possíveis de dependência entre funções, independentemente de ser uma situação particular. A variabilidade de uma função pode ser resultado de uma variabilidade intrínseca desta função, seja variabilidade do ambiente de trabalho ou de influências de outras funções (PATRIARCA *et al.*, 2017).

A instanciação de um modelo FRAM trata-se apenas um subconjunto de acoplamentos potenciais (PATRIARCA *et al.*, 2020); eles representam acoplamentos ou dependências reais que aconteceram ou que se espera que ocorram em uma situação ou cenário específicos. Consiste em uma representação de um subconjunto de funções mutuamente acopladas em determinadas condições ou dentro de um determinado período de tempo. Os acoplamentos realizados para uma instanciação específica não variam - são considerados “fixos” ou “congelados” para as condições assumidas. Para uma análise de eventos, a instanciação normalmente compreende toda a trajetória do evento e os acoplamentos então existentes. O FRAM é utilizado para descrever os acoplamentos entre as funções, por isso é necessário garantir que os aspectos de cada função sejam definidos para assim caracterizá-los. Os aspectos entrada, saída, controle, pré-condição, recurso e tempo são, portanto, necessariamente identificados no modelo. A descrição da variabilidade é uma descrição de como as funções podem depender umas das outras (MACCHI, 2010). A [Figura 6](#) a seguir ilustra o *layout* dessa caracterização.

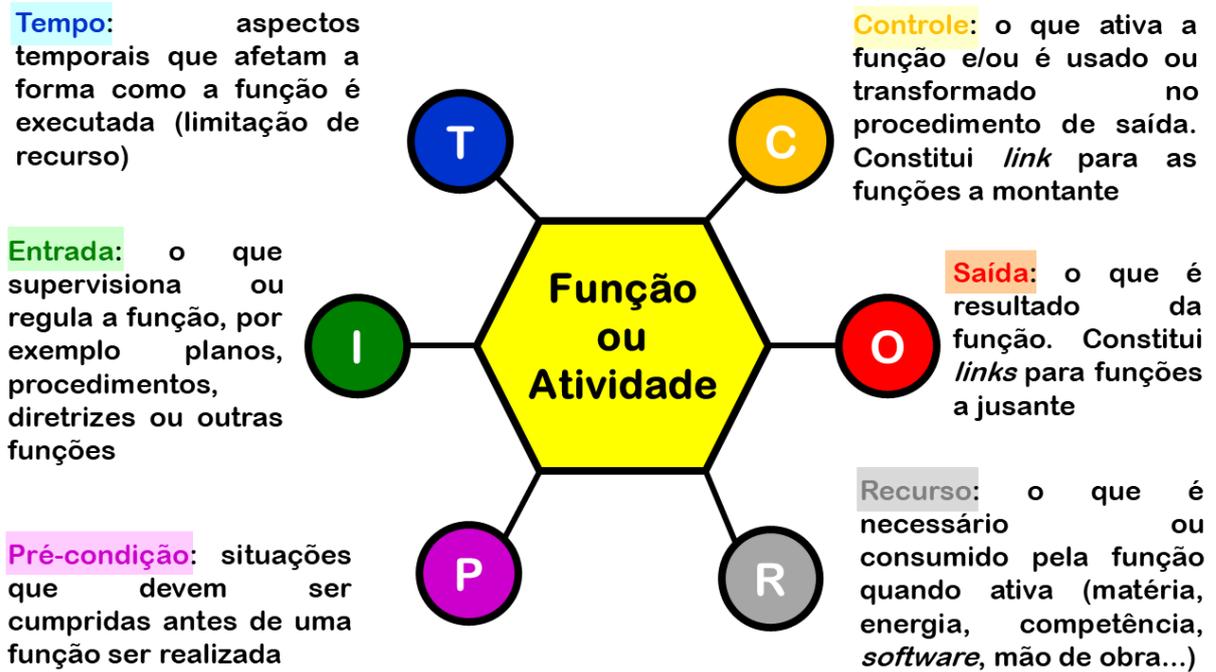


Figura 6. Os seis aspectos que caracterizam uma função ou atividade: i) Tempo (T): aspectos temporais que afetam a forma como a função é executada (limitação de recurso); ii) Entrada (I): o que supervisiona ou regula a função, por exemplo planos, procedimentos, diretrizes ou outras funções; iii) Pré-condição (P): situações que devem ser cumpridas antes de uma função ser realizada; v) Controle (C): o que ativa a função e/ou é usado ou transformado no procedimento de saída. Constitui *link* para as funções a montante; v) Saída (O): o que é resultado da função e estabelece *links* para funções a jusante; vi) Recurso (R): o que é necessário ou consumido pela função quando ativa (matéria, energia, competência, *software*, mão de obra...). Adaptado de Hollnagel (2012).

Uma função é executada conforme o necessário *fenótipo*, apresentado aqui apenas tempo e precisão. Portanto, uma solução simples consiste em descrever as consequências da variabilidade de desempenho para a análise de saída de uma função e sua variação em termos de tempo e precisão. Uma função necessária não é executada (ou seja, sem saída) ou é executada de maneira insuficiente (ou seja, com precisão inaceitável). Uma função incorreta, sendo executada, induz uma saída inaceitável. Uma função correta pode ser executada antes ou depois do tempo necessário, ou fora da sequência e, portanto, ocorre na hora errada (PATRIARCA *et al.*, 2017).

Para fins de ilustração, a Figura 7 exemplifica as descrições dos aspectos apresentados nas Figuras 2 e 6 para cada uma das seis funções já introduzidas, a saber: i) Obter chá; ii)

Esquentar água; *iii*) Dispensar chá na água quente; *iv*) Esperar por 4 minutos; *v*) Acrescentar açúcar; *vi*) Beber chá pronto. Os aspectos vinculados as tais funções são: Obter chá (α); Chá obtido (β); obter chá (γ); Chá em infusão (δ); Infusão finalizada (ϵ); Chá adocicado (ζ).

Nome da Função	Obter chá	Nome da Função	Esquentar a água
Descrição	Comprar ou pegar na dispensa	Descrição	
Aspecto	Descrição do Aspecto	Aspecto	Descrição do Aspecto
Entradas (<i>I</i>)		Entradas (<i>I</i>)	Obter chá (α)
Saídas (<i>O</i>)	Obter chá (α)	Saídas (<i>O</i>)	Chá obtido (β)
Pré-requisitos (<i>P</i>)		Pré-requisitos (<i>P</i>)	
Recursos (<i>R</i>)		Recursos (<i>R</i>)	
Controle (<i>C</i>)		Controle (<i>C</i>)	
Tempo (<i>T</i>)		Tempo (<i>T</i>)	

Nome da Função	Dispensar chá na água quente	Nome da Função	Esperar por 4 minutos
Descrição		Descrição	
Aspecto	Descrição do Aspecto	Aspecto	Descrição do Aspecto
Entradas (<i>I</i>)	Obter chá (γ)	Entradas (<i>I</i>)	Chá em infusão (δ)
Saídas (<i>O</i>)	Chá em infusão (δ)	Saídas (<i>O</i>)	Infusão finalizada (ϵ)
Pré-requisitos (<i>P</i>)	Chá obtido (β)	Pré-requisitos (<i>P</i>)	
Recursos (<i>R</i>)		Recursos (<i>R</i>)	
Controle (<i>C</i>)		Controle (<i>C</i>)	
Tempo (<i>T</i>)		Tempo (<i>T</i>)	

Nome da Função	Acrescentar açúcar	Nome da Função	Beber o chá pronto
Descrição		Descrição	
Aspecto	Descrição do Aspecto	Aspecto	Descrição do Aspecto
Entradas (<i>I</i>)	Infusão finalizada (ϵ)	Entradas (<i>I</i>)	
Saídas (<i>O</i>)	Chá adocicado (ζ)	Saídas (<i>O</i>)	Chá adocicado (ζ)
Pré-requisitos (<i>P</i>)		Pré-requisitos (<i>P</i>)	
Recursos (<i>R</i>)		Recursos (<i>R</i>)	
Controle (<i>C</i>)		Controle (<i>C</i>)	
Tempo (<i>T</i>)		Tempo (<i>T</i>)	

Figura 7. Descrições de todos os aspectos apresentados na Figura 2, sobre o procedimento desde o preparo até a degustação de um chá ilustrado pelo método FRAM para seis funções, a saber: *i*) Obter chá; *ii*) Esquentar água; *iii*) Dispensar chá na água quente; *iv*) Esperar por 4 minutos; *v*) Acrescentar açúcar; *vi*) Beber chá pronto. Os aspectos vinculados as tais funções são: Obter chá (α); Chá obtido (β); obter chá (γ); Chá em infusão (δ); Infusão finalizada (ϵ); Chá adocicado (ζ).

A saída a jusante de uma função pode variar de maneira característica, conforme ilustrado na [Tabela 1](#). As mudanças na variabilidade são representadas pela seguinte notação: [↑] significando que a variabilidade provavelmente *aumentará*; [↓] significando que a variabilidade provavelmente *diminuirá* (*amortecimento*); e [↔] significando que a variabilidade provavelmente permanecerá *inalterada*.

A seguir apresentamos uma proposta analítica da variabilidade dos acoplamentos entre a saída das funções a montante e suas consequências nos aspectos a jusante a ser considerada neste trabalho.

A [Tabela 1](#) representa o efeito da variabilidade do componente saída da função anterior nos componentes da função seguinte. Nessa tabela apenas os fenótipos, características temporais, tempo de cronometragem e precisão utilizadas na análise. O tempo, através de suas características temporais foi utilizado como indicador de variabilidade entre os acoplamentos da saída de uma função anterior para os componentes da função posterior. nessa análise incluiu-se as consequências das variabilidades exógenas e exógenas no resultado. Importante lembrar que no método FRAM outras características temporais são apresentadas, mas não utilizadas na análise padrão.

[Tabela 1](#). Consequência da variabilidade a montante e a jusante ([MACCHI, 2010](#)). As setas indicam variabilidades aumentando (↑), diminuindo ou amortecendo (↓), ou ainda mantendo-se inalterada (↔). Há situações onde mais de um caso pode ocorrer, como por exemplo quando a função a jusante está apenas esperando pela entrada (*), e esta pode requerer tempo adicional; desta forma, possivelmente pode amortecer a variabilidade.

Variabilidade de Saída a Montante		(I)	(P)	(R)	(C)	(T)
Tempo	Muito cedo	↑ ↓*	↑	↔ ↓	↑	↑
	Em tempo	↓	↓	↓	↓	↓
	Muito tarde	↑	↑	↑	↑	↑
	Omissão	↑	↑	↑	↑	↑
Precisão	Impreciso	↑	↑	↑	↑	↑
	Aceitável	↔	↔	↔	↔	↔
	Preciso	↓	↓	↓	↓	↓

* Nos casos em que a função posterior estão apenas esperando pela entrada, uma entrada pode fornecer tempo adicional e, portanto, possivelmente amortecer a variabilidade.

O modelo FRAM pode ser usado para procurar potenciais acoplamentos críticos a montante e a jusante. A variabilidade real pode ser identificada através de uma análise detalhada dos acoplamentos. Funções com múltiplos acoplamentos podem determinar se a ressonância funcional pode ocorrer. A probabilidade e magnitude da variabilidade requerem etapas analíticas adicionais (MENEZES *et al.*, 2021).

2.5. Uso das Características Temporais em Instanciações FRAM

A Tabela 1 apresenta o foco da análise FRAM no estudo da variabilidade da função no aspecto de saída considerando uma descrição detalhada dos aspectos de tempo (cronometragem), tempo de início da função e a precisão na sua realização.

O tempo (T) e as limitações temporais que afetam a função são considerados tempos de *início*, de *término* ou *duração* da atividade, ou seja, é preciso considerar a variabilidade em termos de *tempo* bem como *duração*. Na variabilidade de saída, o tempo tem duas características temporais importantes, *velocidade* e *duração*. A duração significa que uma ação pode ser muito *curta* (pode ser interrompida antes de ser concluída) ou muito *longa* (contínua, embora tenha sido interrompida).

A variabilidade na duração pode ser consequência da realização de uma ação, executada em velocidade errada, ou seja, muito rápida ou demasiada lenta. Em muitos casos, há um limite para a velocidade em que algo pode ser feito, pois atalhos podem ser prejudiciais na execução de uma tarefa.

Dependendo do contexto sociotécnico, a análise da influência e do impacto das características temporais do aspecto tempo pode variar. O tempo de chegada e a precisão são importantes em processos contínuos e automatizados, sendo importantes na aviação (SAWARAGI *et al.*, 2006; WOLTJER *et al.*, 2007; WOLTJER, 2008; HOLLNAGEL *et al.*, 2008); em energia nuclear (LUNDBLAD *et al.*, 2008), e em processos em lote (ou batelada) (MENEZES *et al.*, 2021), sendo que a precisão não é um aspecto crítico.

Características temporais como a cronometragem de tempos e de durações das funções, fornecem uma indicação analítica mais robusta e eficaz na análise do sistema sociotécnico, quando observadas nas áreas a analisar. Portanto, analisar quais características temporais a serem utilizadas depende do contexto sociotécnico trata-se de um critério relevante.

2.6. Avaliação das Características do *Timing* ou no Início da Função

Na [Tabela 1](#), referente ao componente de cada aspecto, o tempo disponível para a função a ser desempenhada a jusante aumenta ou diminui a pressão temporal. Isso, por sua vez, pode ter impacto na precisão e no período de produção de saída. Uma entrada antecipada na função a jusante pode fornecer tempo adicional, e diminuir a variabilidade nos casos em que a função a jusante aguarda apenas a entrada. O aspecto de entrada na variação temporal da variabilidade em relação a um tempo muito precoce pode ocorrer devido a uma partida prematura, possivelmente falta de entrada (\uparrow) ou (\downarrow), sem efeito (\leftrightarrow) ou ainda um possível amortecimento (\downarrow) ([HOLLNAGEL, 2012](#)).

O aspecto do recurso na variação temporal da variabilidade em relação a um tempo muito precoce pode ter uma variabilidade sem efeito (\leftrightarrow), ou ainda um possível amortecimento (\downarrow). Quando a saída ocorre muito cedo, ou uma função é concluída muito cedo, executada mais rápido do que o necessário, ou pode ainda indicar que parou antes, pode significar que houve uma saída prematura. Quando a saída de uma função é concluída num período normal de tempo, existe um possível amortecimento da variabilidade. Quando a saída de uma função é concluída muito tarde, ou seja, uma saída atrasada, pode indicar que foi executada com velocidade insuficiente, ou continuou além do tempo previsto, quando deveria ter parado ([HOLLNAGEL, 2012](#)).

2.6.1. Avaliação Quanto à Característica Temporal de Precisão

Em termos de precisão, uma saída pode ser precisa, aceitável ou imprecisa, conforme ilustrado na [Tabela 1](#). Ao se referir aos acoplamentos entre as funções a montante e a jusante, a precisão é relativa e não absoluta. Considera-se que a precisão é decisiva para a variabilidade das funções tecnológicas em sistemas supervisórios por meio de *softwares* ([HOLLNAGEL, 2012](#)).

Quando a saída é precisa, satisfaz as necessidades das funções a jusante, não aumentando a variabilidade das funções, mas podendo reduzi-la. Uma saída aceitável pode ser usada pela função a jusante, o que pode exigir algum ajuste ou variabilidade da mesma. Uma saída é imprecisa quando algo está incompleto, impreciso, ambíguo ou de alguma outra forma errônea. As consequências são do mesmo tipo que para uma saída aceitável, mas a magnitude é muito maior.

A [Tabela 1](#) demonstra a integração dos fenótipos *timing* (cronometragem) e precisão, considerando sistemas não automatizados ou contínuos, resumindo as consequências da

variabilidade que impactam os aspectos de acoplamento da função jusante (HOLLNAGEL, 2012). A Tabela 2 a seguir detalha cada um dos itens da Tabela 1, justificando as consequências da variabilidade a montante no aspecto de entrada da função a jusante.

A Tabela 2 demonstra como a variabilidade acontece em processos automatizados apenas com o estudo através do *timing* (cronometragem) e precisão. Os processos automatizados são controlados e gerenciados por um *software* supervisor, sem regulação para eventos imprevistos no projeto. Iremos tratar detalhadamente deste aspecto na metodologia. Tal item é extremamente relevante para a discussão dos resultados, conforme descrito nos capítulos posteriores.

Tabela 2. Justificativa das consequências da variabilidade do montante no aspecto de entrada da função a jusante, usando a integração dos processos analisados considerando processos contínuos ou automatizados (MACCHI, 2010).

Características temporais		Entrada	Pré-condição	Recursos/ Condições Complementares	Controle	Tempo	
Cronometragem da atividade	Quantificação do tempo	Muito cedo	Tempo de entrada prematuro, possivelmente perdido ou não ↑↓	Falso início: pré-condição pode estar perdida ↑	Tempo de recurso prematuro, possivelmente perdido ou não ↔	A entrada de controle pode estar perdida ↑	Início do salto, hora incorreta ↑
		Em tempo	Sem efeito, possível amortecimento ↓	Possível amortecimento ↓	Possível amortecimento ↓	Sem efeito, possível amortecimento ↓	Sem efeito, possível amortecimento ↓
		Muito tarde	Função em atraso, levando a atalhos ↑	Possível perda de tempo ↑	Possível perda de tempo ↑	Padrão de controle para este propósito pode ser usado ↑	Atividade em atraso; conflitos; atalhos em atividade; perda de sincronização ↑
		Omissão	Falha na execução da função ou atraso severo ↑	Maior improvisação; possível perda de tempo ↑	Substituição por abordagens alternativas, se possível; improvisação ↑	O substituto do controle "omissão" pode ser encontrado ↑	Substituição por abordagens alternativas, se possível; improvisação ↑
Precisão	Impreciso	Perda de tempo, perda de precisão, mal-entendidos ↑	Possível perda de tempo (desambiguação); possíveis mal-entendidos ↑	Funcionamento inadequado ou reduzido ↑	Função de partida ou de parada imprecisa ou incorreta ↑	Maior variabilidade ↑	
	Aceitável	Sem efeito ↔	Sem alteração ↔	Sem efeito ↔	Sem efeito ↔	Sem efeito ↔	
	Necessário	Possível amortecimento ↓	Possível amortecimento ↓	Possível amortecimento ↓	Possível amortecimento ↓	Possível amortecimento ↓	

2.6.2. Avaliação Quanto à Característica Temporal da Duração

A relevância deste fenótipo duração é que impacta de maneiras diferentes em processos automatizados e em bateladas. Quando o processo é em bateladas e gerenciado pelo ser humano, é possível regular ou adaptar um atraso ou antecipação de uma entrada, pré-condição ou recursos na função seguinte a jusante. O fenótipo duração em certos processos em bateladas pode ser utilizado como recursos para mitigar ou eliminar a variabilidade de um acoplamento.

A variabilidade da saída devido ao tempo, velocidade e duração significa que uma ação pode ser muito *curta* (parada antes de ser concluída) ou muito *longa* (continuada embora devesse ter sido interrompida). A consequência é o desempenho de uma atividade com a velocidade errada, muito rápida ou muito lenta. A duração pode ser uma consequência de fazer algo com a velocidade errada, seja muito rápido ou muito lento. Em muitos casos, há um limite para a rapidez com que algo pode ser feito; exemplos que podem ser citados vinculados ao problema desta tese levam em conta situações ao frear um caminhão ou ainda ao resfriar um material.

Importante salientar que, em processos automatizados, a duração está programada em projeto e não pode ser modificada, mas nos processos em bateladas a duração pode sofrer adaptações, pois a gestão é do ser humano, o qual adapta e modifica as etapas do processo (MENEZES *et al.*, 2021). A chegada muito cedo ou em atraso de uma saída da função a montante para uma função a jusante pode impactar e ocasionar uma disfunção num processo automatizado, mas pode ser regulada nos processos em bateladas. Essas adaptações dependem muitas vezes da vivência do operador, conhecimento técnico, habilidade e experiência.

2.6.3. Análise da Variabilidade dos Acoplamentos através da Integração das Três Características Temporais

A análise dos acoplamentos de saída da função a montante em aspectos da função a jusante integrando características temporais resulta em um indicador robusto focado na atuação eficiente na variabilidade.

Na análise de sistemas sociotécnicos contínuos e automatizados predominam as funções tecnológicas e o gerenciamento realizado por supervisor dos sistemas se dá por meio de *softwares*. A diferença do estudo desses acoplamentos com as funções tecnológicas está na dificuldade de possíveis adaptações e mesmo regulações, pois nas funções humanas o homem

realiza e retém a gestão do processo. Os seres humanos têm a capacidade de ajustar seus comportamentos para atender às demandas de desempenho (MENEZES *et al.*, 2021). A necessidade de ajuste deve-se à natureza dos sistemas industriais e implica que o desempenho deve ser variável.

A integração das características temporais, tempo, precisão e duração tem o objetivo de criar um indicador com valor agregado robusto para diversos aspectos que influenciam o desempenho (MENEZES *et al.*, 2021).

Um modelo FRAM pode ser utilizado como suporte para a proposição de indicadores, como base em monitoramento cuidadoso e preciso. Na linguagem de controle de processo isso significa que a variabilidade deve ser gerenciada, especificamente, e mitigada para não sair do controle, ocasionando possíveis resultados adversos. A gestão eficaz de um sistema ou de um conjunto de processos requer não só que se conheça o estado atual, mas também que se disponha de meios para uma intervenção *eficaz* no processo. Os meios devem permitir que os responsáveis pelo sistema o conduzam com segurança na direção e velocidade corretas (HOLLNAGEL, 2012).

A seleção de indicadores de desempenho requer um bom entendimento do que ocorre no sistema. Os sistemas tecnológicos baseiam-se no conhecimento do desenho e arquitetura do projeto. Nos sistemas sociotécnicos nem sempre há uma base de comparação, e a compreensão do que ocorre no sistema é muitas vezes incompleta, ou mesmo imprecisa. Um modelo FRAM pode ser usado para identificar condições que podem potencialmente sair do controle, identificando acoplamentos que podem levar a um aumento na variabilidade de desempenho (HOLLNAGEL, 2012).

Em um acidente, do ponto de vista da segurança, o modelo e a identificação de indicadores são usados para desenvolver um método de avaliação de segurança que é aplicado para interpretar o evento. A identificação dos riscos e requisitos de segurança são as conclusões da execução deste processo (HOLLNAGEL, 2009).

A escolha de um indicador simples e integrado agrega vários aspectos que influenciam o desempenho, pois uma mais-valia é mais difícil de interpretar e mais fácil de gerir do que uma lista de vários indicadores. Isso requer a identificação e o desenvolvimento de conjuntos adequados de indicadores. A sua interpretação permite tirar conclusões sobre o nível de segurança e suportes. A seleção de indicadores é muitas vezes uma questão pragmática, representando uma combinação de fatores operacionais e o significado de um *trade-off* entre eficiência e eficácia. Em alguns casos, sua validade é empírica (ou estatística), ou seja, refere-

se a um extenso conjunto de observações, especificamente de correlações entre dois eventos ou conjuntos de dados. Na literatura existem vastas listas deste tipo de indicadores de desempenho, sendo possível citar [Tarrants \(2009\)](#), [OECD Nuclear Energy Agency \(2005\)](#) e [Swuste et al. \(2016\)](#).

Poucos documentos apresentam fundamentos para a seleção de indicadores. É importante que tais indicadores sejam significativos, fáceis de usar e simples. É necessário encontrar um equilíbrio adequado entre ser mensurável e significativo. O FRAM suporta a identificação de indicadores de desempenho significativos através da relevância do acoplamento funcional na variação de desempenho. Com uma representação de conjunto é possível entender a dinâmica do sistema e sua probabilidade de ter ressonância.

[Hollnagel \(2012\)](#) caracterizou a variabilidade de desempenho usando os modos de falha que fazem parte da maioria dos modelos de segurança, a fim de descrever as consequências do desempenho variabilidade. Esses modos de falha, ou fenótipos, são as categorias que descrevem como a variabilidade de uma função pode ser vista no resultado de uma função. A [Tabela 3](#) apresenta alguns fenótipos utilizados na análise da variabilidade, incluindo alguns exemplos de situações.

Variabilidade	Descrição / Exemplo
Tempo/ Duração	<i>Muito cedo</i> : uma função é concluída muito cedo, executada mais rapidamente do que o necessário ou encerrada antes do que deveria (saída prematura)
	<i>Muito tarde</i> : uma função é concluída muito tarde, executada com velocidade insuficiente ou continuou além do ponto em que deveria parar (saída atrasada)
	<i>Omissão</i> : uma função que não é encerrada dentro do tempo ou do intervalo permitido.
Força / Distancia / Direção	<i>Muito fraco</i> : insuficiente para atingir o efeito desejado.
	<i>Muito forte</i> : excessivo para o efeito desejado
	<i>Muito curto</i> : não vai longe o suficiente ou está na direção errada
	<i>Muito longo</i> : vai longe demais ou está errado
Objeto Errado	A saída consiste num objeto errado, como por exemplo uma ferramenta, ou pontos que levam a um objeto errado. Tal objeto pode ser um vizinho (proximidade), algo semelhante ou ainda um objeto não relacionado.
Sequência	Saídas que incluem uma sequência de objetos, de movimentos ou de estado, que podem variar da seguinte maneira: <i>Omissão</i> : falta alguma parte da sequência; <i>Salto</i> : uma parte da sequência não tem continuidade, seja qual for a direção; <i>Repetição</i> : uma parte da sequência é repetida sem necessidade; <i>Reversão</i> : duas partes adjacentes da sequência mudam de lugar; <i>Erro</i> : uma parte estranha ou irrelevante ocorre na sequência.

[Tabela 3](#). Descrição elaborada da variabilidade de saída envolvendo cinco aspectos: tempo / duração; força / distancia / direção; objeto errado e sequencia, conforme [Hollnagel \(2012\)](#).

Na tese o estudo de caso apresenta a condição de variabilidade do fenótipo duração nas chegadas de caminhões para o descarregamento de ácido, a ser detalhado nos próximos capítulos. Os atrasos e as chegadas antecipadas podem ser regulados, modificando os tempos de execução das funções seguintes. Como será demonstrado, os operadores adaptaram a sequência do processo produtivo de trabalho a fim de evitar efeitos negativos variabilidade no sistema.

O importante é saber identificar a variabilidade potencial e a real na etapa seguinte do processo produtivo e suas consequências de como pode afetar as funções a jusante é relevante para segurança de processo. Ou seja, é necessário tratar a real possibilidade, por isso é necessário saber avaliar o contexto de trabalho.

A [Tabela 4](#) a seguir apresenta a integração dos dois fenótipos padrões utilizados no FRAM com o acréscimo do fenótipo duração. O estudo entre interconexões é par-a-par, utilizando as tabelas do FRAM do livro de [Hollnagel \(2012\)](#). Descrevemos sucintamente análise passo a passo:

i) Consequência da variabilidade endógena e exógena por tipo de função. De acordo com as tabelas 6.1 e 6.2 de [Hollnagel \(2012\)](#). A consequência da variabilidade de saída da função a montante nos aspectos relacionados por tipo de função a jusante e o tempo de resposta, temporização, tabela 6.3.

ii) Consequência da variabilidade de saída da função a montante em aspectos relacionados por tipo de função a jusante em relação ao tempo de resposta, tabela 6.4 de [Hollnagel \(2012\)](#). A variabilidade resultante entre o item 2 e o item 3 é verificada de acordo com o tipo de aspecto relacionado a jusante, conforme tabelas 7.1. a 7.5.

iii) Comparar com os resultados da tabela 8.2., lembrando que o processo não é contínuo e sim em lotes, portanto pode haver adaptações gerenciadas pelo operador de processos. A consequência da variabilidade das interligações par-a-par da saída da função a montante quanto aos aspectos por tipo de função a jusante em relação à duração, tabela 6.5. O resultado da variabilidade entre os itens 2 e 3 com o item 5, duração.

iv) Verificar o resultado de cada interpretação par-a-par, de acordo com o tipo de aspecto a jusante relacionado conforme tabelas 7.1. a 7.5. Comparar com os resultados da tabela 8.2., lembrando que o processo não é contínuo e sim em bateladas, portanto pode haver adaptações gerenciadas pelo operador do processo. Observou-se que em várias fases do processo analítico devem ser consideradas as influências endógenas e exógenas por tipo de

função, bem como a possibilidade de adaptações realizadas pelo manejo humano e a eliminação do aumento de variabilidades.

Já que no processo em bateladas há a predominância das funções humanas, a análise deve contemplar a predominância por tipo de função e fenótipos específicos e significativos, tornando a análise o mais eficiente e objetiva possível (MENEZES *et al.*, 2021).

A inclusão do fenótipo duração ratifica a solidez da análise, uma vez que quando as funções humanas predominam mais do que as funções tecnológicas em um sistema sociotécnico, a precisão do tempo torna-se irrelevante. A característica de precisão, conseqüentemente, não tem uma ação significativa na variabilidade de desempenho em processos não contínuos.

Acrescentamos na análise o fenótipo duração porque observamos que nos processos em bateladas o ser humano, quando efetua a gestão, consegue adaptar situações que poderiam criar variabilidade no sistema e mitigar eventos inadequados. A depender de sua habilidade e experiência, o operador realizava adequações e modificações no procedimento dos processos bastante criativas e indutivas. Ocorrem então mudanças no procedimento operacional, com eliminação atividades a fim de acelerar o ritmo de trabalho, mudando a rotina. E com isso a instanciação para estudo.

Runte (2010) declarou que os ajustes feitos são geralmente tão eficazes que eles tendem a permanecer invisíveis para os trabalhadores em todos os níveis da organização (e não só aos próprios trabalhadores, bem como para os gestores). A menos que um esforço seja feito para vê-los como eles acontecem, as adaptações são normalmente visíveis apenas quando estão implicadas como fatores explicativos, ou seja, na ocorrência de falhas. Como esta tese irá demonstrar nos capítulos seguintes, os ajustes não são simplesmente causas da falha. Eles são a mais importante causa do sucesso. Os ajustes “corretos” irão contribuir para o trabalho a ser realizado em tempo hábil e seguro.

Conforme notado por Hollnagel (2012), há uma diferença significativa quando se trabalha com processos automatizados, onde as adaptações não são possíveis e o tempo é um fator importante no controle do supervisor através de um *software*. De fato, alguns aspectos são imprescindíveis para as funções de um sistema automatizado atuar com segurança, como por exemplo: uma entrada, pré-condição e recursos sempre no tempo certo a fim de dar prosseguimento ao processo. Já no processo em bateladas, gerenciado pelo homem, as adaptações são possíveis.

Na [Tabela 4](#) é possível observar as consequências da saída da função a montante nos aspectos da função a jusante, usando a integração combinando três fenótipos temporais característicos; *timing* (cronometragem), precisão e duração de processos em bateladas e contínuos. Desta forma foi elaborada a presente [Tabela 4](#), onde foi efetuado um estudo de toda variabilidade no processo produtivo observado, baseado no livro de [Hollnagel \(2012\)](#).

Em linhas gerais, a variabilidade de uma função resulta de uma combinação da própria variabilidade da função e da variabilidade derivada das saídas das funções a montante dependendo do tipo de função e do tipo de aspectos vinculados.

Neste trabalho, o estudo da variabilidade focou em qual tipo de função analisada, tecnológica, humana, ou organizacional, a fim de identificar as influências endógenas e exógenas. Após essa identificação observou-se a influência dos fenótipos *timing* (cronometragem), precisão e duração nessas funções. Em seguida foram analisados cada acoplamento a partir da saída de cada função para os aspectos da função seguinte. Observou-se que as funções humanas tinham respostas diferentes, acoplamentos de saída para os aspectos de entrada, pré-condição e recursos nos processos em bateladas, aceitando adaptações que eliminavam ou mitigavam a variabilidade.

A [Tabela 4](#) visa, portanto, atender a análise da variabilidade tanto em processos automatizados quanto em bateladas com predominância para funções humanas. A análise do processo em bateladas consiste num resultado da tese a ser explicado nos próximos capítulos, mas é apresentada aqui de modo comparativo com o processo automatizado de [Hollnagel \(2012\)](#). Desta forma, todas as variabilidades integradas definidas nos cinco aspectos foram analisadas. Representa a integração dos três fenótipos com base no estudo e pesquisa da influência das variabilidades, tendo como foco uma análise prática e uma representação agregada da variabilidade de desempenho, a fim de assegurar maior solidez nas conclusões analíticas.

Observando as atividades no estudo de caso realizado e apresentado por [Menezes et al. \(2021\)](#), foram identificados importantes diferenças na análise da variabilidade entre processos automatizados e em bateladas quando o homem gerencia o processo. Algumas diferenças básicas foram contempladas na análise, associadas entre o processo contínuo (ou automatizado) ou em bateladas, como o descarregamento de ácido a ser analisado nesta tese.

Pode-se citar, como exemplo, que há diferenças entre a resposta da variabilidade do aspecto saída da função a montante para os aspectos de entrada, pré-condição e recursos da função a jusante. Nos processos automatizados se esses aspectos não atenderem no momento certo solicitado pelo controle do *software* supervisor, o sistema encerra o processo. Já nos processos em bateladas, gerenciados pelo homem, as adaptações podem ser feitas e a variabilidade regulada ou mitigada.

Conforme metodologia detalhada no próximo capítulo, as adaptações foram realizadas e a variabilidade, mitigada, possibilitando a continuação sem impactos na segurança do processo produtivo de trabalho descrito no capítulo de resultados. A formação profissional, habilidade, conhecimento técnico e experiência do profissional impactaram diretamente na execução das tarefas e resultados.

[Patriarca et al. \(2017\)](#) declararam que a variabilidade de desempenho pode levar a resultados positivos e negativos. Ao ampliar os efeitos positivos, facilita seu acontecimento sem perder o controle das atividades, e amortece os efeitos negativos, eliminando e prevenindo seu acontecimento. O processo de amortecimento pode exigir mudanças substanciais, mesmo de forma permanente, envolvendo pessoas, organizações ou equipamentos, evitando erros e contribuindo para acertos. Criar barreiras e defesas para prevenir situações prejudiciais é também uma indicação ([HOLLNAGEL, 2012](#)).

2.7. Fatores Humanos: Fatores de Modelagem de Desempenho

Para melhorar a segurança e, portanto, reduzir eventos indesejados, é necessário entender como o desempenho humano é afetado. A identificação e análise dos fatores formadores de desempenho (FAD) pertencem a uma das fases desse processo. A qualidade dos procedimentos, treinamento, *design* do local de trabalho, questões organizacionais, fatores ambientais e condições de trabalho devem ser avaliados para torná-los compatíveis com as limitações do ser humano ([SANTOS et al., 2020](#)).

[Kazmierczak et al. \(2006\)](#) citaram métodos utilizados para coletar e classificar dados sobre o desempenho humano no trabalho. Os métodos contam com a abordagem ergonômica. Técnicas como análise de atividades, observações etnográficas, mapeamento de comportamento e análise cognitiva de tarefas devem ser consideradas quando um(a) especialista em ergonomia precisa de informações sobre fatores que afetam o desempenho humano ([Annett e Stanton, 2000](#)).

A sequência de eventos que leva a um acidente resulta de uma complexa interação de componentes do sistema sociotécnico. Um quadro metodológico foi proposto para identificar os fatores que afetam o desempenho dos operadores de uma unidade de descarga de ácido, e apresentado em detalhe no próximo capítulo. Nesta fase, a abordagem ergonômica baseada na análise do trabalho dos operadores foi utilizada como ferramenta de apoio.

O desempenho humano é influenciado por vários fatores, conhecidos como “fatores que afetam o desempenho” (FADs). Compreender os FADs tem implicações importantes para a análise de confiabilidade humana (ACH), gerenciamento de segurança e gerenciamento e controle de riscos. Além disso, estudos experimentais exploraram o efeito de indicadores específicos dos FADs que podem fornecer informações úteis para quantificá-los (HOLLNAGEL, 2013; SHIRALI e EBRAHIPOUR, 2014; FROST e MO, 2014). Um indicador FAD é um indicador de risco. Um indicador de risco tem várias propriedades quantitativas mensuráveis (por exemplo, frequência ou impacto). Em termos de percepção de risco dos operadores, sugerimos uma abordagem baseada em risco para identificar os principais FADs classificando assim seus riscos.

Liu *et al.* (2017) apresentaram as três tarefas críticas com esta abordagem: (1) *obter* as percepções dos operadores sobre a frequência e o impacto dos indicadores de FAD em seus contextos. (2) *quantificar* as pontuações de risco percebidas de FADs multiplicando suas pontuações de frequência e impacto percebidas; (3) *classificar* os níveis de risco FAD de acordo com uma matriz de risco estabelecida. Pode-se identificar os principais FADs classificando os valores de risco dos FADs ou classificando seus níveis de risco. Técnicas de escala psicométrica e técnicas de comparação pareada têm sido usadas para capturar visões subjetivas e julgamentos de especialistas sobre a importância dos FADs para o desempenho humano em vários sistemas complexos.

Fatores contextuais como alto ruído, baixas e altas temperaturas e produtos químicos perigosos são considerados contribuintes para ações humanas inseguras na análise de acidentes e também fornecem uma base para avaliar os fatores humanos na análise de segurança (HOLLNAGEL, 1998). Alguns modos de falha são particularmente perigosos e podem resultar em acidentes graves e danos aos seres humanos, ao meio ambiente e aos bens materiais (SANTOS *et al.*, 2020).

O espectro de fatores de modelagem de desempenho é grande e pode ser abordado de diferentes maneiras, dependendo do tipo de ambiente onde a classificação é realizada, tais como: nuclear, médico, aeronáutico ou químico (SANTOS *et al.*, 2020). Kariuki *et al.* (2007)

apresentaram os seguintes itens relacionados aos FADs, utilizados na análise quantitativa de risco de processamento químico: organização, informação, *design* do trabalho, interface homem-sistema, ambiente de trabalho, *design* do local de trabalho e características do operador. [Kariuki et al. \(2007\)](#) consideraram ainda os fatores humanos como um requisito básico para determinar a qualidade de segurança das instalações. As áreas fracas podem ser identificadas e as melhorias determinadas. Isso deve levar a uma maior segurança e eficiência operacional. Fatores relacionados ao ambiente de trabalho e fatores de trabalho dentro de um local de trabalho são geralmente conhecidos como fatores humanos ([STRAUB, 2004](#); [BARANZINI e CHRISTOU, 2010](#)).

[Kim e Jung \(2003\)](#) declararam que tais critérios de construção dos FADs representativos e seus subitens foram concebidos utilizando um método misto considerando os seguintes processos de estruturação por propriedade de cada FAD. O primeiro método de estruturação trata de usar a taxonomia específica do FAD *full-set*. Subitens importantes para a avaliação de um FAD são marcados a partir dos itens detalhados fornecidos de um FAD. O segundo método é escolher o FAD representativo do grupo FAD com significado semelhante e organizar os subitens. Em terceiro lugar, incorporar outros fatores da literatura e especialistas em ACH. A taxonomia proposta exigiria modificações contínuas em associação com o desenvolvimento da metodologia ACH. Detalhes da metodologia encontram-se descritos no próximo capítulo.

3. METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DE SITUAÇÕES CRÍTICAS EM SEGURANÇA DE PROCESSOS

A metodologia proposta integra ergonomia com o método FRAM e fatores humanos em um processo de validação. A ergonomia com suas abordagens analíticas fornece um estudo das atividades no processo sociotécnico descritivo e detalhado através das observações das atividades no local de trabalho. Através desse procedimento podemos identificar as atividades principais e de apoio no processo produtivo de trabalho as quais são utilizadas pelo método FRAM no modelo visualizador que utiliza a teoria de sistemas como forma analítica de integração das etapas do processo.

O estudo do sistema sociotécnico do processo iniciou com os seguintes itens: *i)* Análise do processo produtivo: tecnologia, maquinaria, mobiliário, *software*, ferramentas, etc. *ii)* Análise retrospectiva e documental dos procedimentos prescritos. *iii)* Identificação de funções e atividades principais e de apoio. *iv)* Identificação das características das funções. *v)* Entrevistas com operadores (individualmente em grupos técnicos). *vi)* Registros fotográficos e filmes. Também foram identificadas as funções ou atividades primárias, de fundo ou apoio.

A análise documental dos procedimentos e análise retrospectiva dos acidentes e incidentes em diferentes domínios levaram à identificação e criação de diversas taxonomias setoriais dos FADs. O objetivo foi oferecer relevante meio para analisar e melhorar a segurança e prevenção de acidentes, entendendo melhor o desempenho humano. A taxonomia foi criada com base em dados e pesquisas provenientes de domínios específicos, direcionando os resultados para soluções efetivas.

A partir da análise documental, e através da análise retrospectiva de acidentes, além de uma cuidadosa observação das atividades em campo e entrevistas, foram identificadas algumas situações críticas da planta industrial de descarregamento de ácido, como por exemplo: vazamento de ácido sulfúrico em linhas; vazamento de ácido sulfúrico através de juntas; ruptura do mangote de transferência de ácido sulfúrico ocasionado por falha humana; colapso do tanque da caminhão tanque devido a formação de vácuo por iniciar a descarga com a boca de visita do caminhão tanque fechada; transbordamento de tanque de armazenamento devido a erro de alinhamento; queimadura química durante transporte de amostra de ácido; queimadura química devido a choque do caminhão tanque com tubulação durante manobra de estacionamento.

Na sequência, uma análise de risco foi realizada por especialistas em segurança da empresa, onde foram identificados eventos possíveis de ocorrer, descritos a seguir: desarme da

bomba de transferência da caminhão tanque com o caminhão tanque acoplado; passagem de uma das válvulas de dreno para o *header* das linhas de transferência para as áreas com bomba desarmada e caminhão tanque acoplada; válvula manual de dreno (interligação) dando passagem com bomba desarmada e caminhão tanque acoplada; abertura indevida das válvulas de dreno para o *header* e válvula de dreno de um vaso (interligação) com caminhão tanque acoplada e bomba desarmada; falha da válvula de retenção na descarga da bomba após desarme / desligamento da bomba e caminhão tanque acoplada; falha no fechamento da válvula pneumática de sucção das bombas após desarme / desligamento da bomba e caminhão tanque acoplada; bomba ligada com rotor parado; queda de energia; vazamento da linha que alimenta os tanques; bombas de descarregamento operando com boca de visita do caminhão tanque fechada durante descarregamento; escoriações nas mãos ao manusear mangotes e válvulas oxidadas; queimadura química na pele por contato com ácido sulfúrico se houver vazamento em linhas, mangote ou ao abrir tampa superior do caminhão tanque, ou válvulas de fundo ou “*cap*” da caminhão tanque; queda de cima das caminhão tanques; caminhão tanque movimentando com mangote conectado; vazamento de ácido sulfúrico e contaminação do ambiente; transbordamento do tanque devido a nível alto ou alinhamento não adequado para descarregar os caminhões tanques.

Com base nestas observações iniciais, e através da aplicação de fatores humanos, as atividades críticas foram identificadas pela percepção dos usuários do processo sociotécnico na escolha dos fatores que afetam o desempenho humano predominantes nas diferentes categorias selecionadas da taxonomia. A análise do processo sociotécnico e detalhes das funções dos questionários são, portanto, absolutamente necessárias e foram baseadas no procedimento prescrito padrão operacional de [Liu et al. \(2017\)](#). Essa abordagem incluiu a percepção dos operadores e usuários do sistema sociotécnico, os quais através de sua vivência profissional possuem conhecimentos importantes e contributivos na análise. Essa contribuição foi importante para diminuir a subjetividade analítica ([MENEZES et al., 2021](#)).

As categorias escolhidas dos fatores que podem influenciar o desempenho humano foram tecnológicas, ambientais, organizacionais ou relacionados à Complexidade da Tarefa Humana (cognitiva e física), pois o estudo das interações depende dos FADs.

Pode-se antecipar, a partir da cuidadosa análise documental, que a participação do operador foi fundamental devido a oportunidade deles, individualmente, compartilharem seu dia-a-dia e experiência, vivência e memória técnica da área operacional.

Na perspectiva da ergonomia, a instrução da demanda bem como os levantamentos preliminares de natureza global, permitem estabelecer primariamente uma série de fatores, componentes e elementos do processo de produção que interferem na atividade de forma ainda pouco clara ou evidente. O método utiliza ferramentas da análise ergonômica a fim de atender à necessidade de detalhar o funcionamento do sistema sociotécnico, identificando todos aspectos relevantes.

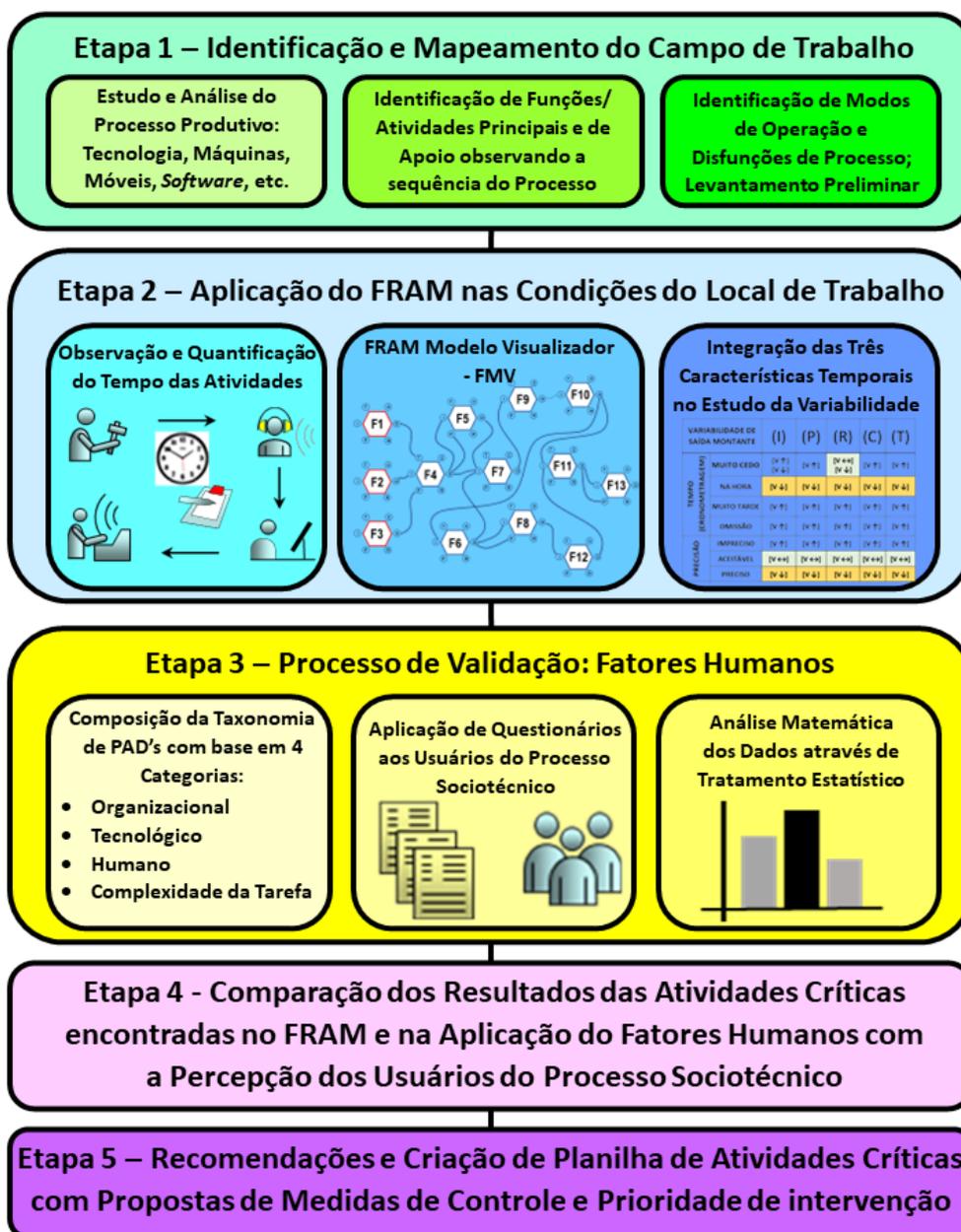
Ao escolher o método FRAM como núcleo da metodologia para compreensão de um complexo sistema sociotécnico, observamos que houve um requisito de análise adicional envolvido devido a necessidade de descrever o real funcionamento do sistema. Através da análise de sistemas, o FRAM analisa de maneira integrada todos os passos do processo sociotécnico e a integração desses componentes no sistema. Isso requer domínio de conhecimento do processo, além de meramente coletar e analisar dados sobre o próprio acidente. Exige que um conhecimento aprofundado do sistema seja estruturado, conforme detalhado acima, e analisado nos capítulos seguintes. Assim, o método é indispensável para organizar os dados e o conhecimento e interpretá-los com um modelo formal para descrições mais precisas do sistema.

A análise da instanciação do modelo FRAM na avaliação de risco inclui, portanto, as seguintes etapas: *i)* Caracterizar a variabilidade real possível ou esperada da instanciação escolhida do modelo e descrever a variabilidade no evento real das funções de primeiro plano e das funções de fundo, essas últimas respondem pelo contexto. A variabilidade real é descrita através de como a saída de cada função pode variar, usando a Descrição simples ou detalhada. *ii)* Identificar as dependências dinâmicas ou acoplamentos (ressonância funcional) que desempenharam um papel no evento descrito. Isso representa a instanciação do modelo, que pode ser usada para entender por que o evento evoluiu como aconteceu. *iii)* Sugerir maneiras de monitorar e atenuar a variabilidade do desempenho (por meio de indicadores, barreiras, projeto / modificação etc.). *iv)* Procurar formas (controladas) de amplificar a variabilidade, em vez de formas de atenuá-las.

Os fatores humanos, através do estudo do processo utilizando FADs, possibilitam empregar uma classificação de pesquisa com base na literatura. Desta maneira, foi construído de forma integrada e consensual usando informes de operadores e especialistas (KIM e JUNG, 2003; LIU *et al.*, 2017, LI *et al.*, 2018, KYRIAKIDI *et al.*, 2018). O estudo diferencial envolveu analisar cada função do processo sociotécnico, e assim possibilitou-se a identificação de funções críticas. A percepção dos operadores sobre as funções mais críticas foi comparada com

os resultados do estudo da variabilidade do método FRAM na identificação das atividades críticas do processo.

A aplicação do método é composta de cinco etapas: A [Figura 8](#) apresenta o fluxograma da metodologia desta tese. Na *etapa 1* identificamos e mapeamos o ambiente de trabalho sob uma abordagem ergonômica, ou seja, centrada na observação das atividades realizadas. Houve consultas na documentação prescrita e nos procedimentos operacionais, conforme brevemente exemplificado no início deste capítulo.



[Figura 8](#). Fluxograma representativo da metodologia proposta descrito em cinco etapas: 1) Identificação e mapeamento do campo de trabalho; 2) Aplicação do FRAM no local de trabalho;

3) Processo de validação por meio de fatores humanos; 4) Comparação dos resultados das atividades críticas obtidas via FRAM e a aplicação de fatores humanos com a percepção dos usuários do processo sociotécnico; 5) Recomendações e elaboração de planilha de atividades críticas com proposta de medidas de controle e prioridade de intervenção.

Na **etapa 2**, sobre a caracterização do ambiente de trabalho, identificamos as funções / atividades principais e de apoio do sistema sociotécnico, com a quantificação de tempo e observação da sequência das mesmas. Essas informações abastecem o Visualizador do Modelo FRAM (FMV) versão 0.4.0, de janeiro de 2018. Nessa etapa foi realizado o estudo da variabilidade com integração dos três fenótipos temporais. Na análise das variabilidades foi acrescentado o fenótipo duração, acrescentando na integração dos fenótipos tempo e precisão. Identificamos assim as funções críticas pelo método FRAM.

Na **etapa 3** utilizamos fatores humanos num processo de validação onde a percepção dos operadores nas respostas dos questionários respondidos diminuiu a subjetividade da avaliação. As etapas para elaborar o questionário foram definidas assim: Primeiro o estabelecimento da estrutura conceitual; baseado em vários artigos atuais pesquisados, e taxonomias estudadas por funcionários da empresa treinados há anos em ergonomia e métodos de confiabilidade humana. O foco foi identificar a taxonomia que atendesse o estudo da área industrial a ser analisada. A construção dos questionários foi participativa e consensual, com operadores treinados há anos em ergonomia e métodos de confiabilidade humana. A análise dos diversos artigos científicos sobre taxonomias, objetivou escolher os específicos fatores que afetam o desempenho por etapa do processo para área industrial a ser estudada. A análise crítica aconteceu no planejamento, e em seguida com verificação se o planejamento foi seguido. Houve a definição dos objetivos do instrumento e da população envolvida; assim como a construção dos itens e escalas de resposta. Os resultados da pesquisa foram apresentados com a utilização de gráficos e tabelas. A interpretação dos gráficos de resultados assegurou que o resultado final foi compatível com os resultados analisados na segunda etapa, e atendeu às necessidades especificadas e indicou uma análise correta e bem estruturada.

Os fatores e a taxonomia escolhida foram suportados em publicações científicas como as de [Kim e Jung et al. \(2003\)](#), [Liu et al. \(2017\)](#), [Dougherty \(1990\)](#), [Kyriakidis \(2018\)](#) e estudos do processo sociotécnico pelos operadores treinados em ergonomia, fatores humanos e métodos de confiabilidade humana. Na validação da abordagem estatística foi utilizada a média como

parâmetro estatístico baseado em dois pilares: *a*) referências como [Liu et al. \(2017\)](#); e *b*) Abordagem por Amostragem (Conveniência ou Amostragem Intencional).

Na **etapa 4**, a comparação dos resultados das atividades críticas encontradas no FRAM foi feita com as encontradas na aplicação dos fatores humanos, nos questionários respondidos pela percepção dos usuários do processo sociotécnico. Na discussão de resultados detalhamos a decisão realizada, e efetuamos a comparação entre resultados.

Na **etapa 5**, as recomendações e criação de planilha de atividades críticas com proposta de medidas de controle e prioridade de intervenção. O critério utilizado na prioridade foram as atividades comuns ao FRAM e fatores humanos. A [Figura 8](#) esclarece cada etapa, detalhada nos próximos subitens.

3.1. Primeira Etapa: Estudo Ergonômico do Sistema Sociotécnico

Essa etapa é composta dos seguintes procedimentos: estudo do sistema sociotécnico pela ergonomia a fim de definir as atividades principais de apoio que servirão de base para elaboração da instância FRAM. A observação direta da atividade e do comportamento dos usuários do contexto escolhido do sistema sociotécnico foi feita por registros fotográficos e filmagens em sequência, observando a atividade durante a execução. Esses registros favorecem a consulta para análise técnica quando necessário. Importante descrever as atividades por etapas de processo, bem como a função operacional, quantificando tempo por frequência e duração. A análise incluiu aspectos como deslocamentos muito longos, a fim de estudar a possibilidade de mudança de *layout* ou arranjo físico, e o tempo na realização de atividades indicando a necessidade de auxílio com aumento ou redução do efetivo.

Nessa etapa devem estar disponíveis o suporte documental e procedimentos operacionais atualizados, assim como as entrevistas, importantes para identificar possíveis procedimentos adicionados e não documentados. Nessa etapa realizou-se a distribuição de questionários aos usuários do contexto do sistema sociotécnico, bastante úteis nos processos de validação do estudo. O acompanhamento da jornada de trabalho do operador, definindo tempo e o percentual de tempo das atividades realizadas foi feito através da observação no local de trabalho e preenchimento da ficha de emprego de tempos. Essas fichas representam a documentação onde foram registrados as atividades realizadas, seus tempos, cronometragem do início e fim da atividade, associando a duração na descrição de cada ação do operador.

Na engenharia de segurança podemos tratar essa ferramenta como análise hierárquica da tarefa, porém nem sempre com o uso da quantificação do tempo. A quantificação é importante em processos onde o tempo não é registrado por *software* ou sistema supervisório. O tempo é um dado importante no estudo da variabilidade potencial pelo Método FRAM.

3.2. Segunda Etapa: Interligação com a Metodologia FRAM

Definidas as funções principais e de apoio, as mesmas foram inseridas no Visualizador do Modelo FRAM (FMV), versão 0.4.0, de janeiro de 2018. Em seguida foram executados os seguintes procedimentos: identificar os acoplamentos entre as atividades principais e de apoio, através dos seis aspectos especificados pelo método FRAM e antecipado na [Figura 6](#); identificar os acoplamentos entre as funções base de estudo para definir as variabilidades de desempenho nas funções; construir um indicador de variabilidade através das integrações das características temporais ([MACCHI, 2010](#)): tempo, precisão e duração, considerando a condição de que o processo em estudo é em bateladas, e não contínuo e automatizado.

3.2.1. Identificação do Desempenho da Variabilidade Incluído com Fenótipo de Duração de Integração Visando Refinar a Análise

Com a aplicação dos dados no Visualizador do Modelo, cada função foi caracterizada pela análise da variabilidade potencial da saída da função de produção a montante, para os outros cinco aspectos (Entrada, Pré-condição, Recursos, Tempo e Controle) da função a jusante ([HOLLNAGEL et al., 2012](#); [BARANZINI e CHRISTOU, 2010](#)). O resultado pode causar variabilidade de qualquer um dos cinco aspectos, modificando o desempenho da variabilidade. Assim, a tarefa desta etapa é examinar o resultado do impacto da saída da função a montante nos cinco aspectos da função a jusante, um por um, e analisar a variabilidade inserida. É importante determinar se a variabilidade ou uma combinação dos aspectos, que pode contribuir, ou causar o desempenho variável da saída. Este trabalho analisou a instanciação potencial em diferentes instâncias do processo. A variabilidade resultante indicou as funções que podem causar uma restrição de segurança. A capacidade de compreender os mecanismos de ressonância subjacentes para a variabilidade de desempenho das funções é altamente dependente de interpretações subjetivas e modelos mentais. O FRAM (FMV) demonstrou o

acoplamento com uma linha que conecta dois aspectos, conforme ilustrado na [Figura 2](#). Esta linha é lógica e clara na saída, seguindo de uma função para outra.

3.2.2. Agregação de Variabilidade para Identificar Atividades Críticas

[Hollnagel \(2012\)](#) descreveu as consequências da variabilidade do componente saída da função a montante nos componentes da função a jusante usando apenas dois fenótipos, ou seja, *timing* e precisão considerando uma solução simples. É importante observar que as consequências dos acoplamentos entre a função anterior de saída e os componentes das funções a jusante são diferentes em um processo automatizado e em um processo em bateladas (conforme ilustrado na [Tabela 4](#)), onde a tomada de decisão pode ser gerenciada pelo ser humano.

[Patriarca et al. \(2017\)](#) declarou que: “nos últimos anos, pesquisadores propõem diferentes maneiras de caracterizar a função variabilidade, com diferentes manifestações de fenótipos: *i*) de solução simples, considerando apenas dois fenótipos, ou seja, tempo e precisão; *ii*) ou mais elaborados, aqueles que adotam múltiplos fenótipos, ou seja, velocidade, distância, sequência, objeto, força, duração, direção, tempo.” Uma extensão natural dos outros fenótipos pode refinar a análise, e não afeta a validade geral do método. A subjetividade analítica do avaliador está presente, e não há mecanismo de controle para aplicar conceitos teóricos em prática, tendo em conta a coerência analítica, linha mestra da metodologia FRAM.

Na solução FRAM mais simples, quando a quantificação do tempo é usada com um tratamento estatístico para identificar atividades críticas, não se identifica que há uma diferença entre processos em bateladas e automatizados. Há necessidade de seguir a análise da variabilidade pela interpretação da linha analítica do FRAM. Nos processos em bateladas, onde um(a) trabalhador(a) realiza o gerenciamento do processo, certas adaptações são realizadas regularmente, eliminando variabilidade potencial. Há também limitações quando o avaliador tem pouco conhecimento do processo.

É importante a integração dos três fenótipos temporais, classificando através da linha analítica FRAM por tipo de função e possível variabilidade de saída em relação ao tempo, precisão e duração. Essa análise conduz a uma interpretação segura das consequências das variabilidades da função saída a montante para os componentes da função a jusante. As análises realizadas entre as interconexões “par-por-par” foram guiadas pelas tabelas do método FRAM

(HOLLNAGEL, 2012), conforme brevemente descrito no capítulo anterior, referente a [Tabela 4](#).

Em várias etapas do processo analítico foi importante considerar as influências endógenas e exógenas por tipos de função, bem como a possibilidade de adaptações realizadas pelo manejo humano e eliminação de variabilidades. Mudanças na sequência de funções, como o tempo de execução da tarefa, podem ser afetadas pelo nível de habilidade do operador individual e seu conhecimento do processo.

Este trabalho foi realizado analisando o potencial de instanciação em diferentes etapas do processo e as funções de variabilidade resultantes que podem causar problemas de segurança (MENEZES *et al.*, 2021). A compreensão dos mecanismos de ressonância subjacentes à variabilidade de desempenho das funções é altamente dependente de interpretações subjetivas e análise de modelos mentais. O FRAM também aumenta a confiabilidade usando regras de interação entre as funções de saída a montante e os aspectos componentes da função a jusante em cada acoplamento, fundamentando ainda mais a análise. A interpretação sistêmica focou em um estudo “par-por-par” das funções dos componentes do acoplamento, usando análise de variabilidade por tipo de função (tecnológica, humana e organizacional) e a influência da variabilidade do contexto endógeno e exógeno. Uma integração foi criada e apresentada na [Tabela 4](#) para incluir a duração do aspecto na análise.

Seguindo a linha de interpretação do FRAM, a consequência entre os acoplamentos da saída da função a montante e os demais aspectos da função à jusante foi analisada através da integração das três características temporais. Essas análises seguem o modelo FRAM, mas há uma diferença observada nos componentes de função entre processos em lote e automatizados (conforme [Tabela 4](#)). No processo automatizado, o *software* de gerenciamento de supervisão não contabiliza atrasos e antecipações em aspectos como pré-condição de entrada e recurso, a menos que tenha sido feita uma previsão no projeto do *software*.

Já no processo em bateladas, a gestão é realizada por indivíduos que podem introduzir adaptações e regulamentações dentro do sistema sociotécnico. Esse aspecto analítico é pouco observado, mas, neste caso, serviu para elaborar uma tabela específica para o processo em bateladas. A [Tabela 4](#) resume o resultado da análise do processo automatizado e em bateladas, apresentando as possibilidades de variabilidade para cada função, suas contribuições e as diversas consequências dos acoplamentos de saída das funções a montante para aspectos das funções a jusante.

3.3. Terceira Etapa: Processo de Validação via Fatores Humanos na Identificação das Atividades Críticas pelos Fatores de Desempenho Escolhidos como Indicadores

Muitos métodos de análise de confiabilidade humana (ACH) usam fatores de modelagem de desempenho (FAD) para modelar o desempenho do operador. Na comunidade ACH, a tendência é aumentar o número de FADs (BORING, 2010; LIU *et al.*, 2014), conforme modelos recentes de FADs (EKANEM *et al.*, 2016; GROTH *et al.*, 2012; WHALEY *et al.*, 2016) e também o modelo de Liu *et al.* (2016). Esses modelos com um grande número de FADs podem sobrecarregar os analistas de ACH e afetar a qualidade de suas análises (FORESTER *et al.*, 2014). De fato, Forester *et al.* (2014) observaram que os métodos ACH considerando uma ampla gama de FADs nem sempre obtinham previsões razoáveis.

A abordagem em estudo suscitou a percepção dos operadores sobre a influência dos indicadores do FAD na área de descarga ácida. A classificação dos FADs como pontuação de risco percebido usou do critério da escolha de sua criticidade nas atividades, usando da escala Likert, variando de 0 a 5. Por meio do FADs, identificou-se as atividades críticas prioritárias. Uma comparação com o método FRAM indicou a importância desses FADs chaves na percepção dos operadores, conforme ilustrado no próximo capítulo.

Na aplicação do método utilizou-se o procedimento operacional prescrito que significa o procedimento operacional padrão sem as variabilidades e intercorrências. Os FADs são definidos em diferentes escalas dependendo do método selecionado, mas geralmente variam de baixa a alta influência. Os métodos ACH geralmente orientam como avaliar o estado de um FAD por meio de medição direta ou extrapolação. Existem mais de uma dúzia de métodos ACH que usam FAD, mas não há um conjunto padrão de FAD usado entre esses métodos. Dentro da comunidade ACH há uma necessidade amplamente reconhecida de um método ACH aprimorado com uma base científica mais robusta (SLIM e NADEAU, 2020; PATRIARCA *et al.*, 2017; OXSTRAND *et al.*, 2009).

3.3.1. Identificação das Atividades Críticas no Procedimento Operacional usando FADs Através dos Resultados dos Questionários Distribuídos

Na terceira etapa da metodologia, de acordo com a Figura 8, uma taxonomia específica dos FADs chaves foi escolhida com a participação dos operadores, embasados em literatura

científica, como as de [Kim e Jung et al. \(2003\)](#), [Liu et al. \(2017\)](#), [Dougherty \(1990\)](#) e [Kyriakidis \(2018\)](#).

Os operadores da área industrial analisada, considerados com conhecimento e domínio dos FADs em seus locais de trabalho, realizaram treinamentos periódicos em ergonomia. Um treinamento específico foi realizado com apresentação das várias taxonomias dos métodos de confiabilidade humana, com o objetivo de capacitar para escolha da taxonomia específica naquela indústria bem como na elaboração dos questionários. Os questionários foram respondidos durante os intervalos do trabalho e entregues ao supervisor da área industrial. A escolha dos fatores críticos de formatação do desempenho por licitação do operador foi feita à cada função de processo.

O questionário foi elaborado com base no procedimento operacional prescrito ([LIU et al. \(2017\)](#)), analisando todas as 10 funções principais por meio de uma classificação específica dos indicadores do FAD que afetam seu desempenho em cada função. Os critérios utilizados para a escolha dos indicadores do FAD em diferentes categorias e grupos seguiram publicações recentes citadas acima, no início desse item. Uma lista abrangente de 55 fatores relacionados à tecnologia, organizacional, humano (cognitivo e físico) e complexidade da tarefa, foi compilada e analisada ([MENEZES et al., 2021](#)). Daqui em diante vamos chamá-los de *grupos*. Tais indicadores FADs estão listados no [Apêndice 1](#). Técnicas de escala psicométrica e técnicas de comparação pareada têm sido usadas para capturar visões subjetivas e julgamentos de especialistas sobre a relevância de FADs para o desempenho humano em vários sistemas complexos ([KIM e JUNG, 2003](#)).

Nas ciências sociais são comumente usados quatro tipos de técnicas de escalas psicométricas: escalas nominais, ordinais, intervalares e de razão ([DOUGHERTY, 1990](#)). Neste estudo, um profissional especialista em fator humano, trabalhando com equipe operacional experiente, pesquisou vários artigos científicos para identificar fatores que influenciam o desempenho humano. As referências utilizadas para a escolha dos indicadores FAD nos diferentes grupos e categorias seguiram uma metodologia de estudo presente em diversas publicações científicas recentes ([KIM e JUNG, 2003](#); [DOUGHERTY, 1990](#); [CHENG, 2018](#); [GROTH, 2012](#); [KYRIAKIDIS et al., 2015](#); [KYRIAKIDIS et al., 2018](#); [FIGUEIRÔA FILHO, et al., 2020](#); [LIU et al., 2017](#)). O diferencial deste estudo foi utilizar os FADs como indicadores para identificar as atividades críticas no processo.

Nos questionários respondidos, para cada atividade analisada foi atribuído um valor absoluto ao indicador FAD incluindo o valor zero, o que significa que o FAD não influenciou

a função analisada. A avaliação foi realizada usando uma escala Likert de 0 a 5, onde 0 – significa nenhuma influência – 1 - muito pouca influência; 2 - pouca influência; 3 - média influência; 4 - alta influência; 5 - influência muito alta (LIU *et al.*, 2017). Os questionários eliciaram a pontuação do grau de influência para cada FAD percebido por cada operador.

A Equação (1) mostra a pontuação do grau de influência percebido para um grupo FAD:

$$\text{média (FAD)}_{g,o} = \frac{1}{I} \sum_{I=1}^I (\text{FAD})_{i,o} \quad (1)$$

onde média (FAD)_{g,o} trata da pontuação média dos graus de influência do FAD pertencentes ao grupo FAD_g; (FAD)_{i,o} trata da pontuação do grau de influência de um indicador FAD_i avaliado pelo operador *o* (sendo que foram 11 no total), e *I* refere-se ao número de indicadores FAD pertencentes ao grupo FAD_g, conforme Menezes *et al.* (2021).

A Equação (2) mostra a pontuação do grau de influência percebido para uma categoria FAD:

$$\text{média (FAD)}_{c,o} = \frac{1}{G-I} \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^I (\text{FAD})_{g,i,o} \quad (2)$$

onde média (FAD)_{c,o} trata da pontuação média dos graus de influência dos grupos do FAD pertencentes à categoria FAD_c; (FAD)_{g,i,o} é a pontuação do grau de influência do indicador FAD_i avaliado pelo operador *o* e pertencente ao grupo FAD_g; *G* refere-se ao número de grupos FAD pertencentes à categoria FAD_c, conforme Menezes *et al.* (2021).

A Equação (3) mostra a pontuação do grau de influência para o FAD de uma função *f* percebida pelo operador *o*:

$$\text{média (FAD)}_{c,o} = \frac{1}{G-I} \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^I (\text{FAD})_{g,i,o} \quad (3)$$

onde média (FAD)_{f,o} trata da pontuação média dos graus de influência das categorias do FAD que avaliam a função *f*; (FAD)_{c,g,i,o} é o escore do grau de influência do indicador FAD_i da categoria FAD_c e pertencente ao grupo FAD_g, avaliado pelo operador *o*, e *C* refere-se ao número de categorias FAD, conforme Menezes *et al.* (2021).

Por fim, a Equação (4) mostra a pontuação do grau de influência do FAD sobre uma função *f*:

$$\text{média (FAD)}_f = \frac{1}{N \cdot C \cdot G \cdot I} \sum_{o=1}^N \sum_{c=1}^C \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^I (\text{FAD})_{c,g,i,o} \quad (4)$$

onde média (FAD)_f é a média das pontuações dos graus de influência do FAD de uma função percebida por todos os operadores avaliadores, e *N* refere-se ao número de operadores avaliadores, conforme Menezes *et al.* (2021).

Outros usos do FAD podem ser encontrados em outros lugares, como em [Figueiroa Filho et al. \(2020\)](#). Também é importante citar que outros procedimentos podem ser considerados, por exemplo, utilizando técnicas multivariadas como análise de correspondência.

3.3.2. Identificação das Atividades Críticas por meio de FADs Críticos

Os dados coletados foram submetidos à análise estatística e foram determinadas médias aritméticas e desvios-padrão. As médias foram escolhidas como parâmetro de avaliação dadas as [Equações \(1-4\)](#), conforme [Menezes et al. \(2021\)](#). Outra vantagem é que tal procedimento permite interpretações quando se utilizam valores médios para comparar dois ou mais grupos semelhantes. Este estudo afirmou que o nível de criticidade de uma função foi idêntico às funções de grau de influência do FAD. Assim, uma vez determinadas as médias dos graus de influência de cada função por meio da [Equação \(4\)](#), a função com maior pontuação deve ser designada como a mais crítica.

Realizou-se a comparação dos dados analíticos com os resultados obtidos na identificação das funções críticas pelo FRAM, e comparados aos resultados dos questionários, identificando as funções críticas por predominância dos FADs. Foram também comparados os resultados com documentos de análise de risco e acidentes, a fim de validar o processo analítico.

Os resultados obtidos identificam quais as funções críticas que necessitam de intervenção. Os resultados analíticos devem identificar funções críticas similares. Um detalhamento encontra-se apresentado nos próximos capítulos.

3.4. Quarta Etapa: Comparação dos Resultados

Em sequência, seguindo a [Figura 8](#), na **etapa 4** há comparação dos resultados das atividades críticas encontradas no FRAM e as encontradas na aplicação dos fatores humanos através da percepção dos usuários do processo sociotécnico. O critério utilizado foi a coincidência entre as atividades críticas identificadas pelo método FRAM e as identificadas na avaliação de fatores humanos. Realizou-se a comparação dos dados analíticos, dos resultados obtidos na identificação das funções críticas pelo FRAM, que são comparados aos resultados dos questionários, identificando as funções críticas por predominância dos FADs.

Os resultados obtidos identificam quais as funções críticas que necessitam de intervenção. Os resultados analíticos devem identificar funções críticas similares.

A **Figura 9** apresenta esquematicamente todo processo analítico para identificação das atividades críticas com aplicação de referenciais metodológicos coniventes ao vincular FRAM (via ergonomia) e FADs (via observação de procedimentos operacionais). A linha de pesquisa e análise seguem um foco interpretativo fortalecido por um processo de validação com a participação coletiva dos usuários do processo sociotécnico analisado que levou a aplicação de medidas de controle apropriadas.

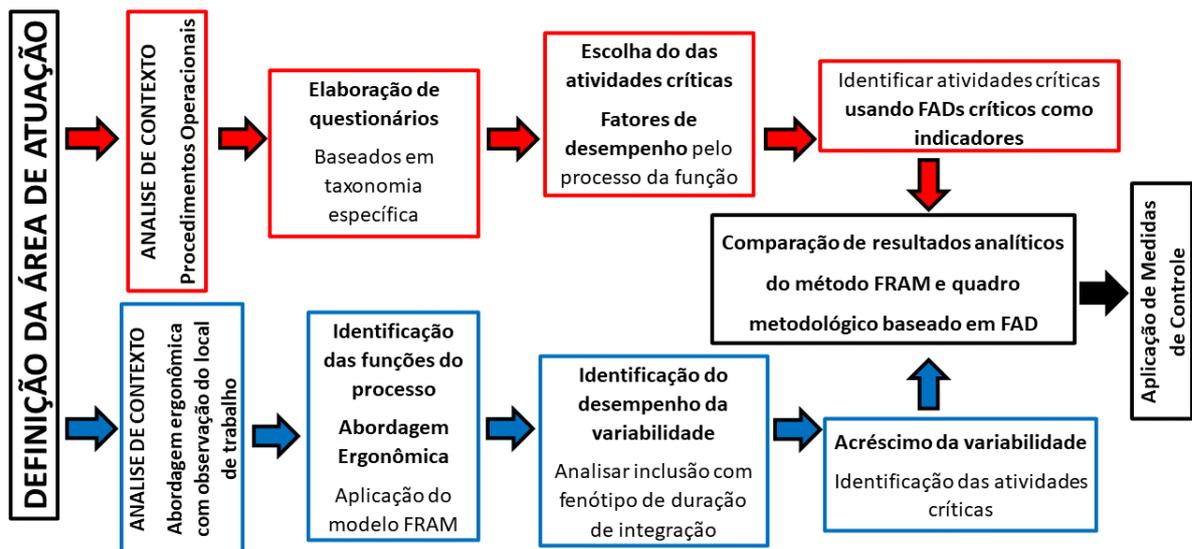


Figura 9. Proposta metodológica para identificar atividades críticas comparando o referencial metodológico FRAM com os FADs. Esta apresenta uma comparação entre o método FRAM e o uso dos FADs elaborado nesta tese visando identificar as atividades críticas por meio da aplicação de medidas de controle. Desta figura, a abordagem ergonômica a partir da observação do local de trabalho levou ao uso do FRAM, enquanto a observação de procedimentos operacionais e o uso de questionários permitiu o desenvolvimento de FADs e consequentemente a escolha de atividades críticas que levou ao uso de indicadores e a aplicação de medidas de controle.

3.5. Quinta Etapa: Adoção de Medidas de Controle

O próximo passo foi definir as medidas de controle e estabelecer medidas de segurança. Ferramentas como avaliações realizadas na área industrial bem como os estudos de análises de riscos e perigos ajudam a planejar medidas de controle a serem adotadas. Nessa etapa as

avaliações da análise de variabilidade pelo FRAM e a identificação dos fatores que afetam o desempenho por fator de impacto associados identificam o foco e as funções prioritárias para intervenção no processo, e medidas de controle efetivas a serem introduzidas no sistema. As recomendações e medidas de controle tornam-se efetivas pois são compartilhadas em um trabalho construtivo, participativo e consensual

4. AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA: APLICAÇÃO EM ESTUDO DE CASO

A tese focou esse estudo de caso particular e complexo, de um único caso, porque este forneceu uma situação peculiar, dentro de um contexto diferenciado devido ao conhecimento dos participantes. O estudo de caso escolhido foi decisivo para testar a teoria bem formulada, para confirmar, para contestar, e estender a metodologia. Esse caso único atendeu todas as condições e representação do fenômeno estudado, exemplo muito representativo, apresentou aspectos positivos, detalhados seguir: A facilidade da análise do contexto e suas variáveis, assim como do levantamento dos dados, contribuíram na identificação efetiva do problema da pesquisa.

A escolha obedeceu a simplicidade da operação que conseguiu abranger as questões importantes com objetividade. A avaliação feita nesse estudo permite uma abrangência metodológica e a utilização em diversas situações diferenciadas. Vários contextos foram oferecidos para análise dentro da indústria, e a escolha foi estudada e baseada na qualidade da contribuição para retorno científico. Nessa área específica da indústria havia um histórico de trabalhos desenvolvidos em ergonomia, e treinamento de profissionais com o conhecimento técnico dos usuários do processo sociotécnico, portanto forneceu um alto nível de respostas às solicitações. O apoio dos coordenadores da segurança de processo e saúde ocupacional e a facilidade de acesso às informações foram decisivos para o desenvolvimento do estudo com transparência e compromisso com resultados. Os resultados obtidos com o estudo de Fatores Humanos através dos FAD's obtiveram compatibilidade com a análise do método FRAM. Demonstrou que a taxonomia escolhida para escolha dos FAD's foi efetiva.

4.1. Descrição do Estudo de Campo: Área de Descarga Ácida

Para o estudo de campo, foi escolhida a unidade de descarga de ácido de uma indústria química, onde o processo de produção se dá por meio de bateladas. Esta indústria química é a segunda maior produtora mundial de pigmento de dióxido de titânio (TiO₂). Possui sete plantas distribuídas em cinco continentes, sendo duas plantas nos EUA, uma na Inglaterra, uma na França, uma na Arábia Saudita, uma na Austrália e outra no Brasil. O processo produtivo no Brasil conta com três unidades de matéria-prima que atendem à demanda da América Latina.

A indústria química, produtora do pigmento branco dióxido de titânio, foi fundada em 25 de janeiro de 1966. A planta analisada utiliza como principal matéria-prima o titânio, ou ilmenita, obtido de uma mina. O pigmento produzido, ou trazido de outras plantas químicas do mundo, é comercializado no Brasil e em toda a América Latina. A indústria utiliza o processo de sulfatação para a produção de pigmentos, com capacidade instalada de 60.000 toneladas, sendo 47.100 toneladas produzidas em 2016 (78,5% da capacidade instalada). Além disso, a planta possui controles que visam mitigar constantemente as paralisações do processo produtivo da empresa, principalmente em relação a seis categorias de fatores fundamentais para a produção do pigmento: água, energia, gás natural, escória, ilmenita e ácido sulfúrico.

A escolha da área de descarga do ácido como foco na indústria química analisada atendeu a todos os critérios de centralidade, onde a sequência do fluxo de produção depende da operação efetiva; bem como os critérios de modernidade, onde são necessários ajustes tecnológicos de médio e longo prazo. A unidade de ácido sulfúrico recebe insumo básico no processo produtivo, armazena e distribui para outras unidades do setor. A programação é realizada observando o recebimento tanto diário quanto mensal do ácido sulfúrico para atender a produção, mantendo uma reserva. O monitoramento é feito por meio de planilha para controle de produção e consumo de ácido sulfúrico, assim como o resíduo de ácido sulfúrico da planta metalúrgica. Este corresponde a um potente ácido inorgânico, relativamente viscoso a temperatura ambiente, incolor, inodoro e altamente corrosivo. O processo da digestão da ilmenita por tal ácido pode chegar a 98% em experimentos de bancada, mostrando, portanto, a eficiência do processo (FREITAS e BROCCHI, 2015).

Durante a análise do processo sociotécnico, foi observado que a comunicação entre a descarga do ácido e os setores da indústria se dá por rádio, e-mail, *software* de controle e monitoramento, intranet com outras planilhas de monitoramento e relatórios operacionais.

Já as atividades antecedentes ao processo de descarga de ácido consideradas são: atividades do operador-manutenção no reparo das mangueiras, travas e gaxetas da bomba; manobras de drenagem das linhas ácidas; coleta de ácido sulfúrico para análise laboratorial; inspeção dos tanques de armazenamento de ácido sulfúrico; manobras dos níveis dos tanques de ácido; limpeza da área de trabalho; inspeção diária dos chuveiros de emergência e lava-olhos. O armazenamento de dados e o controle de estoque são realizados por meio do sistema supervisor, onde é possível acompanhar os níveis dos tanques de ácido sulfúrico e, conseqüentemente, a disponibilidade do insumo para uso. Existem relatórios de

acompanhamento e relatórios operacionais na intranet que apresentam os dados da área para posterior consulta.

O monitoramento da chegada dos caminhões é controlado pelos responsáveis pela pesagem dos caminhões de ácido sulfúrico, que devem informar o operador do painel na sala de controle sobre a entrada do motorista na planta. Este procedimento ocorre em conjunto com o monitoramento por uma câmera, disponível para visualização pelo operador do painel. O operador de campo tem um papel importante nesse processo, pois é ele quem direciona o acesso ao cais de descarga por meio de orientação visual, quando necessário.

O operador que descarrega o ácido tem uma forte função de *background*, dando suporte ao operador da área externa e ao operador do painel quando necessário. O operador atua nas oportunidades de tarefa com um apoio em outros setores da indústria, sob as demandas das tarefas disponíveis, quando há ausência prevista e programada de caminhões de ácido sulfúrico para descarga. As Figuras 10 e 11 ilustram algumas das atividades na área.



Figura 10. Estação de descarga dos caminhões.

A estação de descarregamento de ácido foi projetada a fim de atender caminhões tanques de um específico tamanho, projeto e marca. O novo projeto a ser implementado objetivou apoiar a movimentação do operador acima do tanque do caminhão, especificamente na atividade de abertura da boca de visita do tanque, checagem dos dutos de conexões de mangotes, etc. Ocorreu que o projeto mostrou-se incompatível quando no novo contrato foram utilizados outros modelos de caminhões tanques no processo de trabalho. As dimensões dos tanques causaram incompatibilidade dimensionais com os dispositivos de segurança, causando desconforto e risco. Durante nosso trabalho na área, a possibilidade de novo projeto foi revista.



Figura 11. Iniciando o procedimento de descarga de ácido, onde é possível perceber os funcionários usando os EPIs necessários.

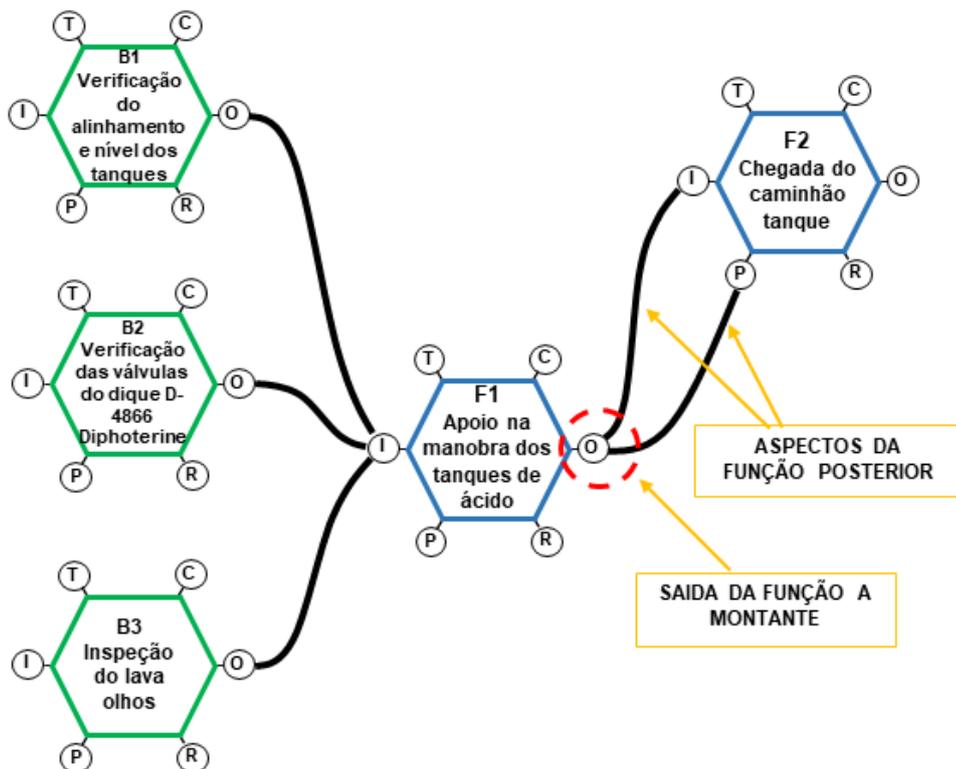
Na **Figura 11**, os operadores da área de descarregamento preparavam-se para iniciar o descarregamento. A quantidade de EPIs (Equipamento de Proteção Individual) utilizada atrapalhava muito as anotações e elaboração dos *checklists* através da escrita em papel. Os EPIs consistiam em: farda; capacete; óculos de ampla visão; bota de PVC; roupa de proteção química (PVC; Gorotex; Tyvek, etc.); luvas antiácido; capuz de PVC ou máscara balaclava de Gorotex,

kit diphoterine, Protetor facial. Para abertura de BV eram necessários: cinto de segurança; respirador antigases ácidos; dispositivo trava-quedas, além dos itens citados anteriormente.

A proposta de trocar a escrita do *checklist* em papel por dispositivo digital que facilitasse o manuseio na inserção de informações no documento foi informada e estava em estudo.

4.2. Apresentação dos Resultados Obtidos

A seguir mostramos os resultados do estudo de caso observado e analisado em seu momento inicial envolvendo apenas as duas primeiras funções, conforme ilustrado na [Figura 12](#). No método FRAM, as funções de fundo são representadas por hexágonos com contornos verdes. Tais funções são ações constantes e sem modificações no procedimento operacional. As outras funções, representadas por hexágonos azuis, consistem nas funções principais e dinâmicas, que podem sofrer modificações durante o processo produtivo de trabalho. Nas funções principais estudamos as variabilidades do sistema sociotécnico.



[Figura 12](#). Acoplamento ponto a ponto entre a saída da Função 1 (F₁, referente ao apoio na manobra dos tanques de ácido) para a entrada e a pré-condição da Função 2 (F₂, referente a chegada do caminhão tanque), vinculados a planta de descarregamento de ácido. As funções de

fundo B₁, B₂ e B₃ são representadas por hexágonos com contornos verdes, e as principais, hexágonos com contornos azuis. Dois aspectos da função posterior F₁ estão vinculados a saída da função a montante (*output O*).

Em detalhe, a [Figura 12](#) representa a caracterização do estudo dos acoplamentos e a identificação das variabilidades de uma função através da influência da saída da função F₁ em cinco outros aspectos da função F₂ vinculados a planta de descarregamento de ácido introduzida nos capítulos anteriores. A saída de F₁ (referente ao apoio na manobra dos tanques de ácido) encontra-se acoplada apenas à entrada e pré-condição da função F₂ (referente a chegada do caminhão tanque). Em nosso estudo, aplicamos a análise desses acoplamentos e os resultados das variáveis definem o desempenho da função ([MENEZES et al., 2021](#)).

Nessa tese, a adição da duração ao *timing* (cronometragem) e precisão auxilia na compreensão de como identificar a variabilidade e consequências em situações reais de uma planta industrial ([PATRIARCA et al., 2017](#)). Toda a planta de descarregamento foi cuidadosamente descrita via FRAM, conforme visto adiante, e publicado por [Menezes et al. \(2021\)](#).

O estudo da variabilidade de uma função pode ser avaliado por mais de um fenótipo conforme publicado por [Patriarca et al. \(2017\)](#). Uma extensão natural a outros fenótipos, mesmo que pudesse refinar a análise, não afetaria a validade do método. Em termos de temporização, uma saída pode ocorrer muito cedo, na hora, muito tarde, ou ainda não ocorrer (ver [Tabela 4](#)). “Nem um pouco” representa a possibilidade de que a saída seja tão tarde para ser usada para seus propósitos ou mesmo não produzidos. Em termos de precisão, a saída pode ser precisa, aceitável ou imprecisa. Se a saída é precisa, satisfaz inteiramente as necessidades e exigências de sua função a jusante, conforme visto na [Tabela 4](#). Se for aceitável, requer algum ajuste na função posterior, ainda maior caso seja impreciso. Uma quarta categoria, errada, representa uma saída completamente diferente da esperada. Neste caso, em vez de ajustes, a função posterior requer improvisação, amplificando a variabilidade da função ([PATRIARCA, 2017](#)).

Analisando essas instanciações, é possível identificar cenários críticos, fatores humanos, riscos e variabilidades que têm uma influência direta e relação intrínseca com a segurança. Então uma sugestão razoável seria monitorar e mitigar ou diminuir o desempenho da variabilidade (que através da solução emerge para entender os indicadores do modelo de interações, barreiras, *design* / modificação, etc.) ([FRANÇA, 2020](#)). Para resultados positivos

inesperados, deve-se, é claro, procurar maneiras (controladas) de amplificar a variabilidade em vez de maneiras de amortecê-la (HOLLNAGEL, 2017).

Durante visitas regulares à unidade operacional, foi realizado o estudo de campo e análises preliminares de documentação (conforme visto no Capítulo 3), utilizando-se o estudo dos procedimentos padrão, programas de análise de riscos de segurança, como HAZOP (“*Hazard and Operability*”), relatórios de acidentes e incidentes e normas internas de segurança. Os documentos fundamentaram o entendimento das atividades e equipamentos relacionados ao pátio de descarga de ácidos. Conforme detalhado no capítulo anterior, a análise abrangeu o processo produtivo: tecnologia, maquinário, mobiliário, *software*, ferramentas, etc., análise retrospectiva e documental dos procedimentos operacionais, identificação das funções e atividades de primeiro e segundo plano, identificação das funções características a partir das entrevistas com os operadores (individualmente, em grupos, técnicos), registros fotográficos e filmes. A conversa com os operadores da área foi outro fator importante, com seus conhecimentos e memória de longo prazo, conforme descrito por Menezes *et al.* (2021).

No turno das 7h às 15h, as condições climáticas de exposição ao sol do meio-dia eram muito intensas, assim como a existência de atividades extras paralelas, como a emissão de permissão de trabalho seguro, entre outras. O turno mais calmo era o noturno, das 23h às 7h, onde as condições climáticas, sem exposição aos raios solares, eram mais leves. Um operador descarregava dois caminhões simultaneamente. O estudo dos caminhões recebidos por turno no período de onze meses, registrando que os turnos 7h × 15h e 23h × 7h recebiam a maior quantidade. Uma variabilidade endógena que influenciava as atividades no pátio de descarga era a frequência diária dos caminhões, apresentando variações devido à disponibilidade dos fornecedores quanto à liberação do produto, sendo que havia o transporte de 60 km entre o fornecedor e a indústria analisada. As operações eram compostas por: 1 técnico operacional, 9 operadores II e 14 operadores I, sendo 19 da manutenção, realizando reparos e serviços de manutenção como troca de válvulas e gaxetas em pequenos trechos de dutos na área industrial. A frequência dessas atividades era baixa, na medida de uma vez por semana durante meia hora. Os turnos eram compostos por uma equipe de cinco, onde três trabalhavam e dois descansavam. O horário administrativo é das 7h30 às 16h30, e os turnos são das 7h às 15h, das 15h às 23h e das 23h às 7h.

4.3. Cenário Nominal

O Cenário Nominal (em Segurança do Trabalho chamamos de procedimentos operacionais Norma Regulamentadora NR-1, e na ergonomia de procedimento prescrito) representa o desempenho que resultaria quando os procedimentos são rigorosamente aplicados. Uma instanciação do modelo utiliza informações detalhadas sobre uma situação particular ou cenário para criar uma instância ou um exemplo específico do modelo. Isso corresponde a uma organização temporal das funções que reflete a ordem em que eles irão ter lugar no cenário, dependendo de quanto existe variabilidade. Uma instanciação do modelo FRAM mostra como um subconjunto de funções podem ser mutuamente acoplados sob determinadas condições ou dentro de um determinado período de tempo. Os acoplamentos contidos em uma instanciação específicos são considerados estáveis durante o cenário. Para uma análise de evento, a instanciação normalmente irá corresponder à duração de todo o evento e os acoplamentos que existiram na época. Uma avaliação de risco geralmente inclui um conjunto de representações onde cada instanciação representa os acoplamentos entre funções a montante e a jusante em um determinado momento ou para determinadas condições.

Esta instanciação pode ser usada como base para a consideração do efeito da variabilidade de funções, e como isso pode-se criar resultados que se propagam através do sistema. A variabilidade de funções também pode levar a conexões inesperadas, bem como os acoplamentos podem tornar-se disfuncionais. Na instanciação do FRAM, as ligações entre as funções representam as dependências entre funções definidas pelos seis aspectos, introduzidos na [Figura 6](#). A posição relativa das funções na representação gráfica simboliza uma sequência temporal, sugerindo relações de causa-efeito ([MACCHI, 2010](#)).

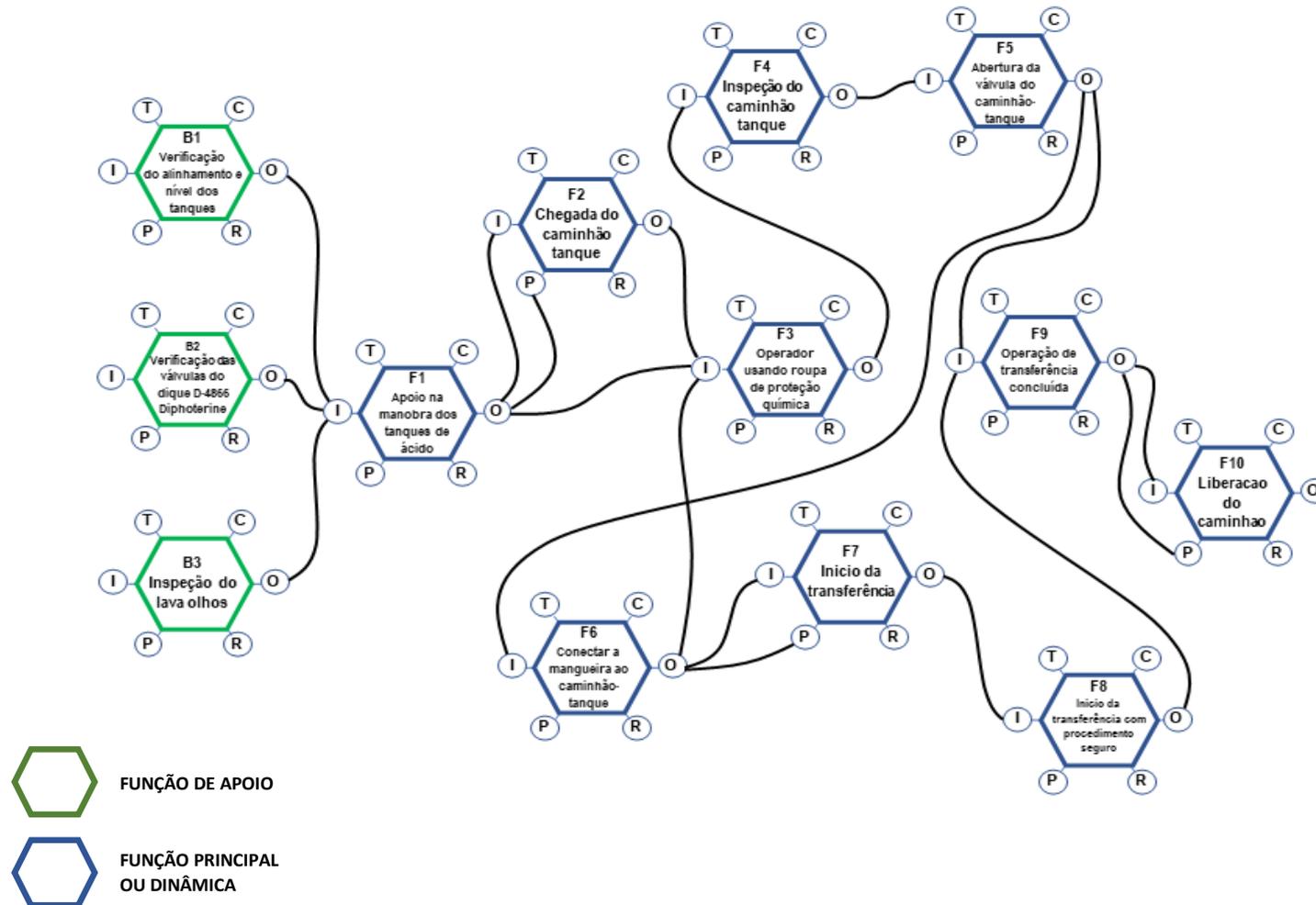
O cenário nominal foi utilizado como suporte da análise por fatores humanos. Tal cenário, baseado no procedimento operacional padrão, representa o descarregamento de um caminhão tanque na unidade e como o operador deve executar com as atividades. A análise pela instanciação nominal teve como objetivo analisar um processo padrão sem modificações, a fim de que apenas a percepções dos operadores sejam parte do foco analítico.

Os questionários foram distribuídos com o objetivo de obter informações importantes com a participação dos trabalhadores nas escolhas dos FADs por atividades mais críticas, sendo a base dessa etapa. Informações importantes como gargalos no processo de trabalho, impactos frequentes ou sazonais, externos ou internos, bem como os principais acidentes, foram compilados. As solicitações de propostas de modificações para melhoria no processo e ambiente de trabalho, presentes nos questionários, ajudou bastante no processo analítico.

Os questionários foram ferramentas muito úteis nos processos de validação do estudo dos sistemas sociotécnicos complexos. Uma abordagem ergonômica participativa e construtiva reduz a subjetividade analítica com conclusões consensuais. Questionários (ver [Apêndice 1](#)) foram distribuídos aos onze operadores. Um questionário inicial foi desenvolvido e utilizado para identificar informações referentes às atividades envolvendo as opiniões de cada operador. A importância dessas ferramentas foi documentada por [Santos *et al.* \(2020\)](#).

A [Figura 13](#) é a representação desse cenário, complementando a figura anterior.

Figura 13. A instanciação nominal do processo de descarga de ácido, representando o procedimento padrão operacional esperado. Cada hexágono representa uma etapa do processo produtivo de trabalho, complementando a figura anterior com novas funções, de F3 a F10.



4.4. Identificação das Funções Principais e de Apoios na Instanciação Nominal

Baseado no procedimento operacional padrão, a representação da [Figura 13](#) contempla as seguintes funções principais e as funções de apoio: B₁) Verificar o funcionamento dos chuveiros de emergência antes de iniciar o primeiro descarregamento de cada turno; B₂) Verificar se dreno do dique estava corretamente fechado antes do descarregamento do primeiro caminhão tanque; B₃) Verificar se o alinhamento dos tanques de ácido sulfúrico atende ao que foi informado pelo turno anterior.

As funções principais foram dez: F₁) Procedimentos de apoio a atividade antes de iniciar o primeiro descarregamento de cada turno. Verificação de tanques, dreno do dique, alinhamento dos tanques de ácido sulfúrico; F₂) Recebimento do caminhão tanque; F₃) Colocar EPIs e inspecionar seu bom estado: inspecionar trava quedas e cinto de segurança; F₄) Inspeção do veículo e tanque; F₅) Coletar amostra: abrir a boca de visita e verificar se a junta de vedação está danificada, se o nível do produto está correto; F₆) Conectar o mangote ao caminhão; F₇) Iniciar transferência; F₈) Iniciar transferência com procedimento de segurança; F₉) Finalizar operação de transferência; F₁₀) Liberação do caminhão tanque.

4.5. Descrição das Funções Principais do Sistema de Descarregamento de Ácido

Apresentamos, item por item, um descritivo detalhado das funções principais do sistema de descarregamento de ácido vinculados a [Figura 13](#):

F₁: *Procedimentos de apoio a atividade*. Essa função é composta de várias atividades, algumas devendo ser iniciadas antes do primeiro descarregamento de cada turno; o operador tem como rotina operacional verificar o funcionamento dos chuveiros de emergência antes de iniciar o primeiro descarregamento de cada turno; verificar se dreno do dique está corretamente fechado antes do descarregamento do primeiro caminhão tanque; verificar se o alinhamento dos tanques de ácido sulfúrico atende ao que foi informado pelo operador do turno anterior.

F₂: *Recebimento do caminhão tanque*. Nessa etapa, após a chegada do caminhão tanque, o operador deverá orientar ao motorista como estacionar o veículo com segurança na área de descarga de ácido. Após o caminhão estacionado, solicitar que o motorista retire a chave da ignição se dirija à sala do operador do descarregamento e entregue a chave, a nota fiscal e o certificado de análise, aguardando lá até o final da operação ou se for chamado pelo operador. Durante todo o período de descarregamento a chave deverá ficar sob a guarda do operador.

Após recebimento da nota fiscal, o operador deverá colocar os EPIs necessários para próxima atividade. Caso detecte alguma anormalidade, escrever relatório de desvio e em seguida avisar imediatamente operador II ou o líder da área para emitir Relatório de Ocorrências Anormais no Recebimento de Granéis Líquidos, e tomar as devidas providências, inclusive contatar a transportadora responsável pelo caminhão tanque.

F₃: *Colocar os EPIs necessários para atividade.* Importante para todos procedimentos realizados que seja feito os *checklist* de todo Equipamento de Proteção Individual (EPI). No caso da trava queda, a carga máxima permitida é de 100 kg, sendo que operadores com peso maior que a capacidade de carga não poderão descarregar o caminhão tanque. Cabe ao empregado inspecionar a trava queda antes do uso, verificando os seguintes itens: sustentação dos trilhos, cabos, vergalhões ou barras; caso não esteja torto ou solto; se não estiver folgado; se a estrutura estiver fixa.

O operador dirige-se até o local, a fim de verificar a fixação com parafusos; verificar se o cinto de suporte desliza sem dificuldades, identificando também o prazo de validade do cinto trava quedas. Outra inspeção trata-se dos parafusos e grampos. Observar a estrutura ao lado e verificar os grampos e parafusos, trazendo a extremidade do sistema para próximo das mãos; observar se os parafusos e grampos estão fixos e sem corrosão. No alinhamento dos trilhos, observar visualmente se os trilhos, cabos, vergalhões ou barras estão alinhados em linha reta. Verificar se indicador de estresse do mosquetão está rompido ou acionado, pois se estiver rompido ou acionado trata-se de uma não conformidade. Quando acionado, dependendo do fabricante, linhas se deformam ou marcas coloridas podem aparecer. Verificar a bola de proteção ou anteparo do cabo, trazendo a extremidade do sistema para próximo de si; observar se a bola ou outro anteparo não está danificando o mosquetão; ganchos de fixação do cabo no cinto devem ser inspecionados quanto a trava e se a abertura está adequada. Verificar se o travamento do retrátil funciona, ou seja, se trava quando o trava-quedas é acionado, além de inspecionar o cinto de segurança: costura, se não está descosturado e/ou desgastado; fivela, se o fecho peitoral está funcionando adequadamente. No mosquetão, verificar se a trava e abertura estão adequadas.

F₄: *Efetuar a inspeção do veículo.* Usando EPIs, o operador deve verificar o rótulo de risco do ácido sulfúrico presente (Número ONU: 1830). Segundo item 1 do *checklist*, realizar os seguintes procedimentos: verificar se as mangueiras de dreno da boca de visita do tanque estão sem vazamentos, verificar se as válvulas de descarga do tanque do caminhão tanque estão fechadas, verificar se as travas das válvulas do tanque das caminhão tanques estão fixadas na

haste, verificar se o tampão do engate do caminhão tanque (*cap*) está conectado, e se a caminhão tanque tem engate rápido.

F5: *Abrir a boca de visita (BV) do caminhão tanque.* Abrir a BV e verificar se a junta de vedação está danificada, se o nível do produto está correto, usando os EPIs conforme item 2.4 O item 2.4 do *checklist* trata dos seguintes itens: inspeção de tampa, proteções e nível de produto. Operador usando todos os EPIs exigidos. Diphoterine¹ disponível no local. Chave do caminhão tanque entregue ao operador pelo motorista e guardada na gaveta da mesa de operação. Tanques de estocagem de ácido, com nível para receber ácido sulfúrico. O item 2.4 do *checklist* descreve os seguintes procedimentos: abrir a boca de visita do caminhão tanque e verificar se a junta de vedação está danificada, se o nível do produto está correto e após o término preencher. Acompanhar as atividades também pela placa de *checklist* existente próximo as duas áreas de descarga. Caso haja alguma anormalidade, avisar ao motorista afim de sanar o problema, comunicar ao operador II para emitir Relatório de Ocorrências Anormais no Recebimento de Granéis Líquidos da empresa, e tomar as devidas providências, inclusive contactar a transportadora. Obrigatória a abertura de relatório de desvio. De acordo com a sequência do lote de recebimento, deverá ser feita a amostra a cada 20 caminhão tanques. Usar coletor e amostrador específico para ácido, identificar e protocolar amostra e enviar para laboratório.

F6: *Conectar o mangote.* Verificar se as válvulas: 1ª (próxima ao tanque) e 2ª (próxima ao *cap*) no fundo do caminhão tanque estão realmente fechadas, checando posicionamento das hastes. Verificar com as duas válvulas de fundo fechadas em seguida, retirar o tampão de proteção fora da linha de fogo.

F7: *Transferência iniciada.* O operador deverá efetuar a seguinte etapa para garantir que as válvulas de fundo do caminhão tanque estejam realmente fechadas e a linha entre a 1ª válvula (próxima ao tanque) e o tampão de proteção (*cap*) estiver drenada: verificar se as válvulas 1ª (próxima ao tanque) e 2ª (próxima ao *cap*) no fundo do caminhão tanque estão realmente fechadas, checando posicionamento das hastes. Com as duas válvulas de fundo fechadas, retirar o tampão de proteção fora da linha de fogo. Conectar o mangote ao caminhão.

F8: *Iniciar transferência com procedimento de segurança.* Após conectar o mangote ao caminhão, abrir a 2ª válvula (próxima ao *cap*) e depois abrir a 1ª válvula de fundo (próxima ao

¹ Diphoterine consiste num líquido incolor que atende a necessidade da lavagem clássica em acidentes químicos; é hipertônica, o que induz por osmose a remoção de agentes agressivos de dentro para fora da pele e dos olhos; é polivalente, o que a faz capaz de desativar e impedir a agressão de substâncias químicas à pele e olhos.

tanque) do caminhão, observar se não há vazamento nas conexões e mangote. Abrir a válvula de sucção da bomba (atentar-se para placa de advertência no local da botoeira). Certificar-se que a BV do caminhão tanque está aberta. Ligar a bomba de transferência de ácido para o tanque de armazenagem. Preencher o item 3 do *checklist*, verificando se todas as etapas descritas a seguir foram seguidas.

Item 3 do *checklist*: inspecionar itens de segurança para a descarga dentro da área de descarga de ácido, no momento de cada ação. Verificar se borboletas de fechamento da tampa superior estão com vedação. Tampa superior do caminhão tanque aberta antes do descarregamento de ácido sulfúrico. Verificar se o caminhão tanque está com engate rápido adequado e se o mangote está conectado ao tanque do caminhão. Verificar se as válvulas de descarga do tanque do caminhão estão abertas e se a bomba está ligada durante o processo de descarregamento. Verificar se as válvulas de sucção manuais e de controle da bomba estão abertas.

F₉: *Finalizar operação de transferência*. Fechar a 1ª válvula de fundo (próxima ao tanque) do caminhão e depois fechar a 2ª válvula (próxima ao *cap*). Verificar se o mangote não tem mais ácido. Fechar a válvula de sucção da bomba de transferência de ácido. Desligar a bomba. Desacoplar o mangote. Se necessário, lavar a área para evitar resíduos de ácido sobre o piso e sobre o caminhão. Recolocar o *cap*, fechar a tampa superior do caminhão. Preencher o item 4 do *checklist* verificando se todas as etapas foram feitas; caso alguma tenha sido esquecida fazê-la antes de devolver a chave ao motorista, dentro da área de descarga de ácido, no momento de cada ação.

O *checklist* item 4 de segurança para liberar o caminhão tanque consiste em: válvulas de descarga do tanque do caminhão tanque fechado. Travas das válvulas do tanque dos caminhões tanques estão fixadas na haste. Válvulas de controle de sucção da bomba fechada. Bomba desligada depois do processo de descarregamento. Mangote sem presença de ácido sulfúrico. Mangote desacoplado do tanque do caminhão tanque. Tampão do engate do caminhão tanque (*cap*) recolocado. Boca superior do caminhão tanque fechado após o término do descarregamento. Chave devolvida ao motorista após o término do descarregamento de ácido.

F₁₀: *Liberação do caminhão tanque*. Devolver a chave ao motorista, solicitar ao mesmo que coloque o caminhão tanque próximo da sala de controle de descarregamento e efetuar o passo “*show me*” com o motorista, mostrando no campo que o caminhão tanque está liberado e com as válvulas e tampa superior devidamente fechadas. Detalhamento do *show me* feito com o motorista. Nesta etapa, o operador e o motorista devem conferir os seguintes itens: se as

válvulas de saída de produto do caminhão tanque estão fechadas juntamente com as travas; se o *cap* foi devidamente recolocado. Assinar o *checklist* todo preenchido juntamente com o motorista e liberar o veículo. A operação de retirada do caminhão tanque do pátio de descarregamento é de responsabilidade da transportadora, representada pelo motorista do caminhão tanque. O operador em hipótese alguma deverá sair da área do descarregamento. Caso seja necessário, o descarregamento deverá ser interrompido e a área deverá ser isolada.

4.6. Cenário Normal

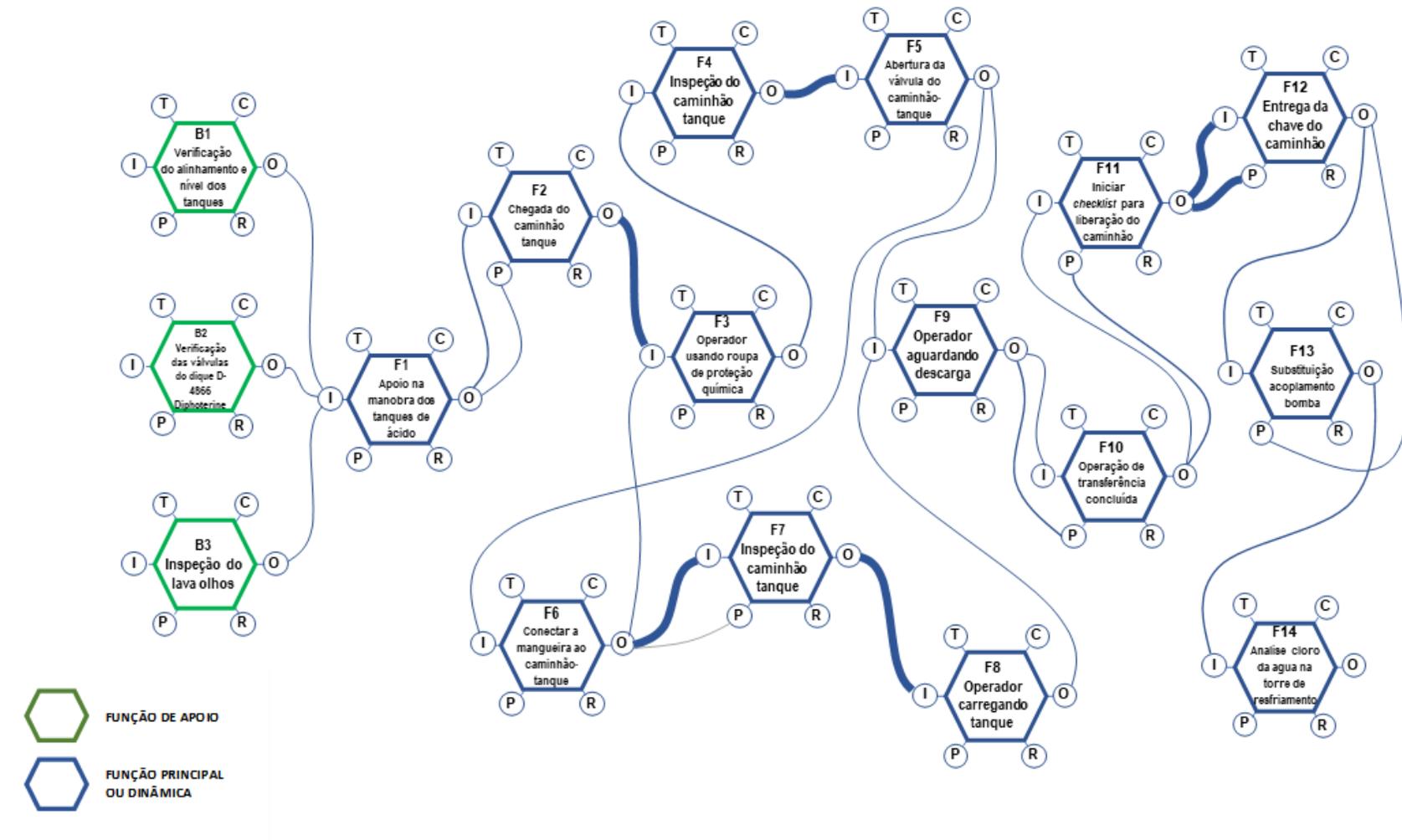
Várias instanciações FRAM foram desenvolvidos para o cenário da área de descarregamento de ácido, entre elas o cenário nominal, de acordo com os procedimentos, e um cenário normal, onde os operadores realizam o trabalho real. O cenário normal é baseado na observação em campo das atividades sendo executadas e em informações coletadas a partir de entrevistas com controladores e de observações das tarefas de campo. Neste cenário é possível tratar de no máximo dois caminhões tanques simultaneamente.

Através dos estudos de instanciações diferenciadas em contexto diferentes, a análise dos acoplamentos e variabilidades fornecem detalhes significativos para avaliação da segurança de processo. A instanciação, juntamente com a avaliação da variabilidade do desempenho, são a base para a avaliação de segurança.

Nessa instanciação, foram atendidos dois caminhões tanques consecutivamente. Houve acréscimo de funções sazonais não descritas no procedimento formal, mas que fazem parte da rotina dos operadores. Essas atividades não constam no procedimento prescrito. Exemplos: operador retornando para sala de operação e retirada da roupa de proteção química; operador aguardando descarga dos caminhões tanques na sala do descarregamento; substituição do engate do mangote da bomba de transferência, e a atividade de análise de cloro da torre de resfriamento.

Na observação de campo verificamos a dificuldade de uso da estação e descarga devido a antropometria incompatível com o tanque utilizado pelos caminhões tanque. O manuseio do suporte das travas quedas não favoreceu o trabalho em altura.

Figura 14. Instanciação real de processo de descarregamento de ácido em uma indústria química. Através da observação das atividades sendo executadas e suas dinâmicas, foi elaborada esta sequência de instanciação. Linhas grossas representam variabilidades de acoplamento significativas.



Na instanciação real observamos as dinâmicas do processo produtivo. A instanciação normal representa a maneira real como o operador lida com suas atividades de maneira mais realista. A descrição das atividades foi baseada em entrevistas e observações de campo realizadas na área industrial. Durante um período de três meses as atividades foram acompanhadas e seu tempo quantificado pela ficha de emprego de tempos utilizada em ergonomia. Foram realizadas quatro instanciações diferentes, e apenas uma foi escolhida para estudo. Os operadores, devido a experiências e competências diferenciadas, ajustavam seu trabalho de acordo com seu modo operatório. Alguns recebem as caminhão tanques consecutivas e descarregam simultaneamente. Outros fazem o procedimento até acionar a descarga só após procederem o atendimento da outra caminhão tanque.

A instanciação representa a dinâmica evolutiva do cenário, apresentando uma sequência de instanciações onde as funções são executadas e acoplamentos surgem à medida que o tempo passa. A [Figura 14](#) é a representação gráfica da instanciação real, obtida a partir das observações em campo, publicadas por [Menezes et al. \(2021\)](#) e descritas no próximo subitem em detalhe, com destaque as linhas grossas dos conectores, que representam variabilidades de acoplamento significativas.

4.6.1. Descrição das Funções da Instanciação Real no Sistema de Descarregamento de Ácido

A seguir a descrição das funções principais e de apoio observadas no local de trabalho durante a elaboração da instanciação normal, conforme indicadas na [Figura 14](#). As funções de apoio foram as mesmas descritas em itens anteriores: B₁) verificar o funcionamento dos chuveiros de emergência antes de iniciar o primeiro descarregamento de cada turno; B₂) Verificar se dreno do dique está corretamente fechado antes do descarregamento do primeiro caminhão tanque; B₃) Verificar se o alinhamento dos tanques de ácido sulfúrico atende ao que foi informado pelo turno anterior.

A seguir, as funções principais são descritas da seguinte forma: F₁: apoio na manobra dos tanques de ácido; F₂: chegada do primeiro caminhão (T₁) à área de descarga; verificação da nota fiscal e análise do certificado; preenchimento do *checklist* inicial e liberação do caminhão na área de descarga; F₃: operador com roupa de proteção química e cinto de segurança; F₄: inspeção do veículo e tanque do primeiro caminhão T₁; F₅: operador inicia o procedimento de descarga; utilização do dispositivo de proteção contra queda para abertura da boca de visita;

verificação do nível do produto e estado da junta de vedação; F₆: chegada do segundo caminhão (T₂) ao cais de descarga; verificação da fatura e análise do certificado; preenchimento do *checklist* inicial e liberação do caminhão no cais de descarga; F₇: inspeção do veículo e tanque do segundo caminhão, T₂; F₈: operador inicia descarga; uso de dispositivo de proteção contra queda para abertura de bueiro; verificação do nível do produto e estado da junta de vedação; F₉: operador aguarda a descarga do caminhão na sala de descarga; F₁₀: conclusão da operação de transferência do caminhão; F₁₁: operador inicia as etapas do *checklist* para liberação do caminhão; fechamento das válvulas de descarga do caminhão; fixação das travas das válvulas; F₁₂: entrega da chave ao motorista do caminhão, aguardando a retirada do caminhão da baía para conclusão da etapa *show-me*; verificação dos procedimentos realizados e verificação do estado do veículo; F₁₃: substituição do bloqueio da mangueira da bomba; F₁₄: análise do cloro na torre de resfriamento.

Conforme ilustrado na [Figura 14](#), a função que aguarda a descarga dos caminhões-tanque no cais de descarga só ocorre quando os caminhões chegam um por vez, permitindo que o operador vá até a sala de operação e aguarde o descarregamento do caminhão tanque.

4.6.2. Descrição das Funções Adicionais da Instanciação Real no Sistema de Descarregamento de Ácido

Conforme pode ser observado, há diferenças entre as instanciações nominal e real, vinculadas as [Figuras 13](#) e [14](#). Funções adicionais foram inseridas a partir da observação no campo de atividade. Em uma delas, vinculada a função F₁₁, o operador aguardando descarga das caminhão tanques na sala do descarregamento; esse período ocorre quando a caminhão tanque está conectada e o operador dirige-se a sala de operação, aguardando o descarregamento no tanque. Na sala de operação (função F₁₂) o motorista confere os *checklist* e emite documentos como autorização de serviços na área industrial referentes a análise de procedimentos de segurança.

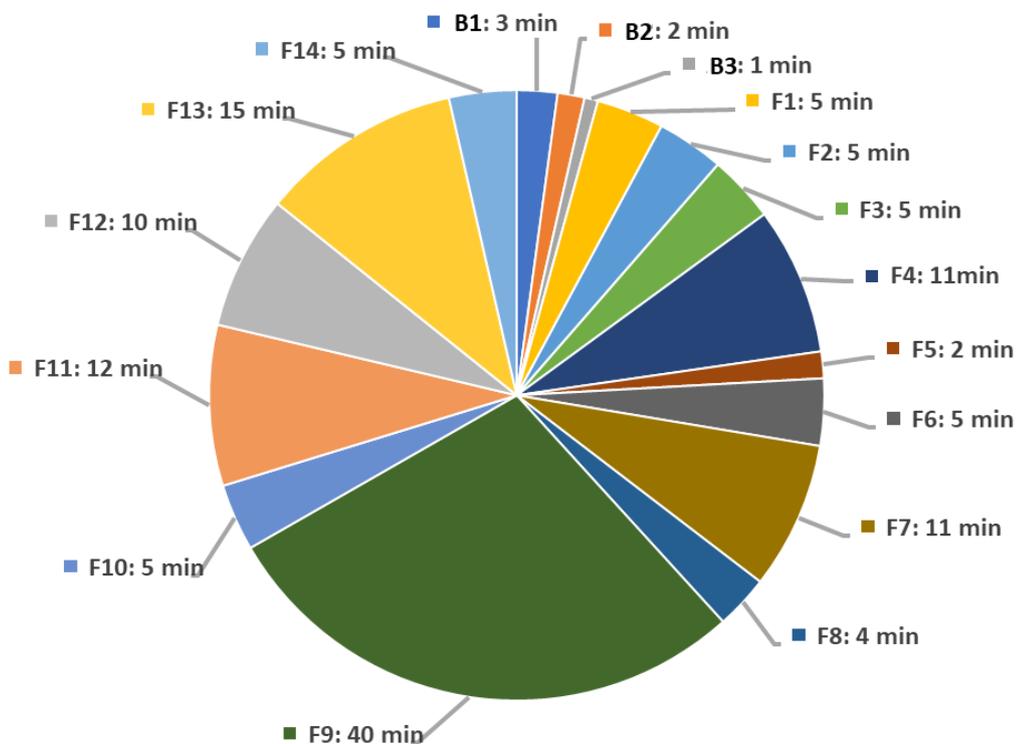
Já na função F₁₃, há a substituição do engate do mangote da bomba denominada G-4817. Essa atividade não é rotineira, mas deve ocorrer quando o operador identifica que existe necessidade de troca do mangote a fim de atender às condições operacionais com segurança.

A última função, F₁₄, refere-se a análise de cloro de torre de resfriamento. Essa atividade não consta no procedimento formal, mas a depender do turno é realizada pelo operador.

4.6.3. Observação das Atividades de Quantificação de Tempo

Na análise de instanciação real composta por funções descritas no item 4.4.1, a [Figura 14](#), apresenta o tempo como indicador de variabilidade agregado, sendo necessário detalhar o que ocorreu para entender as diferenças operacionais em um mesmo procedimento. O estudo da variabilidade passa pela interpretação dessas nuances que muitas vezes não são observadas quando o foco da análise é o tratamento estatístico de dados. Na quantificação do tempo é possível estudar a duração de tarefas semelhantes em diferentes realizações de uma mesma atividade e assim otimizar procedimentos. Várias instanciações foram realizadas neste estudo de caso em diferentes momentos para identificar alterações e mudanças no procedimento nas etapas do processo produtivo de trabalho na área operacional.

A engenharia de segurança analisa essas etapas de processo através da análise hierárquica das tarefas. A ergonomia analisa as atividades como prescritas e formais ou atividades reais quando observadas na sua execução, observando as modificações. Nessa etapa utilizou-se de suporte documental com procedimentos operacionais atualizados e conversação a fim de definir possíveis procedimentos adicionados e não documentados.



[Figura 15](#). Representação do tempo cumulativo de todas as atividades desenvolvidas pelo operador durante um turno de trabalho, correspondente as 14 funções indicadas na [Figura 14](#),

incluindo as três funções de fundo, identificadas por B₁, B₂ e B₃. A distribuição temporal das atividades está na ordem em que foi realizada a sequência cronológica do ciclo de trabalho, totalizando 141 minutos.

A [Figura 15](#) apresenta o tempo cumulativo de todas as atividades desenvolvidas pelo operador durante um turno de trabalho, correspondente as 14 funções indicadas na [Figura 14](#), incluindo as três funções de fundo, identificadas por B₁, B₂ e B₃, e descritas acima. A distribuição temporal das atividades está na ordem em que foi realizada a sequência cronológica do ciclo de trabalho. Desta figura é possível perceber que a atividade 9, referente a operação de transferência, tomou o maior tempo durante o processo.

A construção da [Figura 15](#) foi realizada através da observação das atividades sendo executadas no campo de trabalho. A quantificação do tempo de início e término das atividades por sequência foi documentada na ficha de emprego de tempos. Informações importantes para analisar a variabilidade da instanciação pelo FRAM.

4.6.4. Observações na Análise da Instanciação Real Realizada

Os parâmetros temporais indicados na [Figura 15](#) foram baseados nos tempos de início da atividade ou função, agregando tempo, precisão, mas também incluindo a duração da atividade como uma característica importante do estudo de agregação de variabilidade. O suporte da análise deve considerar o tempo de atividade realizada.

Pode-se concluir que o sequenciamento das tarefas afeta a elaboração da instanciação de FRAM e a quantificação do tempo, dependendo da habilidade e experiência profissional do operador, uma tarefa pode ser eliminada da análise do processo. O modo de operação pode afetar a escolha das funções na instanciação. Por exemplo, em relação ao descarregamento de ácido, um operador experiente pode receber dois caminhões-tanque simultaneamente, eliminando a função de espera, onde o operador revisa a lista de verificação operacional e realiza outras tarefas administrativas. Operadores menos experientes preferem trabalhar com um tanque por vez, recebendo o segundo somente quando o primeiro já estiver conectado ao tanque e descarregando o ácido. Nesta instanciação, dois caminhões tanque foram atendidos consecutivamente.

Durante a realização desse trabalho de campo, várias medidas e restrições de controle foram implantadas, algumas reestruturadas após observação dos resultados na área industrial.

As funções de fundo começam com a verificação do funcionamento dos chuveiros de emergência, que só ocorre uma vez por turno, antes de iniciar a primeira descarga de cada turno.

A função que aguarda a descarga dos caminhões na área de descarga só ocorre quando os caminhões chegam um por vez, permitindo que o operador vá até a sala de operação e aguarde o descarregamento do caminhão. Uma vez lá, o operador verifica o *checklist* e emite documentos como as autorizações exigidas para serviços na área industrial e análises de procedimentos de segurança. A função de substituição da trava da mangueira da bomba 1 não é uma tarefa rotineira, mas deve ocorrer quando o operador identifica a necessidade de trocar a mangueira da bomba para atender as normas de segurança operacional. A análise da função do cloro (F₁₄) na torre de resfriamento depende das necessidades operacionais do turno em que é realizada, e levou apenas 5 minutos, conforme ilustrado na [Figura 15](#). Ressalta-se que foi observado um aumento nas funções de manutenção corretiva, não descritas no procedimento formal, mas que são realizadas esporadicamente pelos operadores.

Concluimos nesse processo de trabalho que as modificações podem ocorrer com frequência, e as instanciações, modificadas ([MENEZES et al., 2021](#)).

4.6.5. Identificação das Situações Críticas Relevantes na Fase de Avaliação Ergonômica

A análise retrospectiva dos incidentes e acidentes pode registrar algumas das seguintes ocorrências na área de descarregamento de ácido, tendo como base a documentação existente e que faz parte do procedimento metodológico indicado no capítulo anterior.

Foi possível identificar os seguintes eventos: *i*) vazamento de ácido sulfúrico em linhas; *ii*) vazamento de ácido sulfúrico através de juntas; *iii*) ruptura de mangote de transferência de ácido sulfúrico, ocasionado por falha humana; *iv*) transbordamento de tanque de armazenamento devido a erro de alinhamento; *v*) queimadura química durante transporte de amostra de ácido; *vi*) queimadura química devido a choque de caminhão tanque com tubulação durante manobra de estacionamento; *vii*) colapso do tanque da caminhão tanque devido a formação de vácuo por iniciar a descarga com a boca de visita do caminhão tanque fechada.

Na fase de análise ergonômica essas situações críticas foram, portanto, identificadas. Durante a elaboração do trabalho de campo, foram feitas sugestões e modificações significativas e importantes: 1) Foi instalado um sensor de monitoramento acoplado a boca de visita do tanque do caminhão tanque, que sinaliza se tal boca está aberta ou fechada. Verificou-

se, porém, que o sensor precisa ter alarme visual e sonoro para avisar caso o operador não observe e não retire o sensor para saída do caminhão tanque. 2) Foi projetado e instalado um dispositivo de segurança com a chave do caminhão, que é acoplada em um painel designado estação de travamento. Após esse procedimento, foi liberada outra chave que era travada no engate *box* do mangote, evitando assim a saída do caminhão com o mangote engatado.

Na observação de campo verificou-se ainda a dificuldade de uso da estação de descarga devido a antropometria incompatível com o tanque utilizado pelos caminhões tanques. O manuseio do suporte das travas quedas não favoreceu o trabalho em altura. A estação foi projetada para um tipo específico de caminhão tanque, não atendendo as necessidades atuais de configuração da plataforma de descarga.

Conforme descrito no início deste capítulo, a utilização de roupas especiais e equipamentos de proteção individual para o manuseio de ácido também dificulta a marcação do formulário de *checklist* necessário para realizar as tarefas com segurança. Observou-se também a necessidade de o operador acompanhar o *checklist* simultâneo a inspeção. A seguir é apresentado um estudo analítico da variabilidade.

4.7. Aplicação da Metodologia no Processo em Bateladas Analisando as Consequências da Saída da Função a Montante nos Aspectos da Função a Jusante

A variabilidade de cada função envolvida foi identificada, e sua contribuição na variabilidade agregada, e a restrição de segurança foi determinada. A análise resultante da variabilidade aplicada na instanciação através de um indicador criado pela integração das três características temporais: *timing* (cronometragem), precisão e duração, pode identificar os cenários discutidos para ocorrência de acidentes discutida na [Tabela 4](#).

4.7.1. No Procedimento Analítico, as Variabilidades Exógenas e Endógenas são Analisadas no Resultado dos Acoplamentos

Cada aspecto foi analisado pelo tipo de função (tecnológica, organizacional ou humana) considerando as variabilidades endógena e exógena, e suas possíveis fontes internas e probabilidade de variabilidade de desempenho. Na análise do contexto identificou-se que as variabilidades exógenas afetaram muito as diversas instanciações, sendo importantes na análise de resultados.

As dificuldades no fornecimento do ácido sulfúrico, as distancias percorridas para entrega com problemas de trânsito e as vezes a falta de caminhões tanques para realizar o transporte nos fornecedores ocasionou diversos atrasos na produção da unidade. Nas variabilidades endógenas observamos que o projeto da estação de descarregamento de ácido só contemplava atendimento de dois caminhões tanques por vez, e o projeto da estação de descarga foi elaborado para um modelo específico de caminhão tanque, causando dificuldades na movimentação acima destes. A importância da análise global de demanda e contexto foi identificada, conforme preconizado por [Menezes et al. \(2021\)](#) sendo fundamental para identificação dessas variabilidades. Uma mudança de contexto pode alterar as variabilidades endógenas e exógenas.

Algumas diferenças básicas no resultado da saída para aspectos entrada, condição e recursos foram contempladas na análise, observadas diferenças entre os resultados nos processos contínuo e / ou automatizados para em bateladas no descarregamento de ácido. Observamos que as adaptações foram feitas pelos operadores a fim de eliminar a variabilidade conforme preconizou [Runte \(2010\)](#) na sua tese de doutorado.

4.7.2. Procedimento Analítico dos Resultados dos Acoplamentos usando o Indicador Agregado

Em seguida foi interpretado o acoplamento das funções a montante considerando os possíveis efeitos em aspectos diferentes como entradas, condições prévias, recurso, controle e tempo de acordo com as funções a jusante.

A análise das funções através da [Tabela 4](#) de integração das características temporais obedeceu ao sequenciamento da instanciação. A avaliação da variabilidade de desempenho das saídas das funções a montante nos aspectos das funções a jusante foi realizada através do indicador de integração com maioria predominante representativa da variabilidade por função.

A análise dos acoplamentos apresentados na [Figura 14](#) contemplou a avaliação da relação de todas as saídas da função a montante com todos aspectos relacionados da função a jusante. Cada relação de acoplamento foi analisada pela variabilidade das características temporais típicas de produção para o tipo de função (tecnológica, organizacional e humana), e os possíveis efeitos por tipo de aspecto ([HOLLNAGEL, 2012](#)).

Conforme ilustrado na [Tabela 4](#), as integrações de características temporais associadas podem ser estudadas e analisadas usando a abordagem FRAM. Mais exemplos de integração são indicados nas tabelas dos capítulos 6 a 8 do livro FRAM de [Hollnagel \(2012\)](#).

4.7.3. Resultados Analíticos da Variabilidade entre as Funções de Primeiro Plano F₂ e F₃

A variabilidade do acoplamento da saída de F₂, relacionado à chegada do primeiro caminhão, à entrada de F₃, sobre o operador vestindo roupa de proteção química e o uso do cinto de segurança, envolveu a dificuldade de preenchimento do *checklist* inicial, conforme apresentado e ilustrado na [Figura 14](#). De acordo com tal [Tabela 4](#), esta resultou em tempo inaceitável, precisão aceitável, duração inaceitável e toda integração inaceitável. O aumento da variabilidade no aspecto de entrada da função a jusante ocorre devido à integração de características temporais, ou seja, o tempo está associado à duração. A variabilidade se deve ao fato de o operador usar roupas de proteção química que possuem cinto de segurança sem usabilidade. O aumento da variabilidade ocorre tanto na verificação do estado do veículo quanto na precisão da documentação do material transportado, pois este possui um elemento cognitivo significativo associado à observação visual. O plano foi adotar medidas de controle que possibilitem o preenchimento do *checklist* inicial item 1 via acesso visual sem escrita. O item 1 do *checklist* encontra-se descrito no item 4.3 da função F₄.

4.7.3.1. Medidas de Controles Adotadas e Planejadas

Criar dispositivo que auxilie o preenchimento do *checklist* do item 1, com acessos visual e sem necessitar da escrita pelo operador, devido à dificuldade de escrita manual quando está usando roupas e EPIs de proteção.

4.7.4. Resultados Analíticos da Variabilidade entre as Funções de Primeiro Plano F₄ e F₅

Analisando como ocorreu o acoplamento da variabilidade entre a saída da função F₄ e a entrada de F₅ resultou em acoplamentos críticos, vinculados a inspeção do veículo e do tanque do caminhão tanque, ao operador iniciando a descarga com uso da trava queda para abertura da

boca de visita, a verificação do nível do produto e o estado das gaxetas de vedação. Todos os acoplamentos da saída de F₄ tornaram-se variabilidades para a entrada de F₅, a saber: *i*) ligação da bomba de transferência de ácido; *ii*) iniciar o descarregamento do caminhão tanque T₁; *iii*) realizar inspeção veicular e preenchimento item 2.do *checklist*; *iv*) remoção da tampa e conexão rápida da mangueira; remoção das travas de travamento do caminhão tanque número 1. O resultado da integração do acoplamento, conforme [Figura 14](#), tendeu a aumentar a variabilidade devido a temporização inaceitável e precisão aceitável. No entanto, a integração com a duração resultou inaceitável. O aumento da variabilidade ocorreu nos procedimentos de inspeção veicular. O item 2.4 do *checklist* encontra-se descrito no item 4.3 da função F₅.

4.7.4.1. Medidas de Controles Adotadas e Planejadas

Na função inspeção do veículo e do tanque, a boca de visita do caminhão tanque deve ser mantida aberta até o termino da transferência. Na inspeção e abertura da boca de visita foi instalado um sensor de segurança para controlar a abertura da boca de visita a fim de monitorar essa abertura devido a acidentes anteriores. O alarme precisa ser visual e sonoro para indicar a presença do sensor a fim de ser retirado na saída do caminhão tanque.

Necessário observar as posições de abertura das travas dos caminhões tanques pois alguns possuem acionamento em direções diferentes, podendo ocasionar acidentes. Caso essas válvulas estejam abertas, o produto ácido passa para a linha de descarga do tanque. Esse controle é feito pelo operador sem um auxílio de um sensor. Foi, portanto, importante criar um dispositivo de alarme, a fim de restringir a abertura do *cap* caso as válvulas de restrição de passagem do ácido para o mangote de descarga estejam abertas. Se o operador abrir o *cap* da descarga do caminhão tanque com as válvulas dando passagem, receberá um banho de ácido. No término da transferência de ácido, criou-se um procedimento adicional com acionamento da bomba por poucos minutos a fim de evitar ácido residual no mangote. Atualmente, o sistema de acionamento da bomba está automatizado com o acionamento de um *dial* pelo operador, ocorrendo o fechamento no término da transferência.

4.7.5. Resultados Analíticos da Variabilidade entre as Funções de Primeiro Plano F₆ e F₇

O acoplamento da saída da função F₆ para a entrada e pré-condição da função F₇ resultou em um aumento da variabilidade. As saídas da função F₆ são, conforme indicadas na [Figura 14](#):

i) Preencher a lista de verificação e iniciar a inspeção do veículo tanque T₂; *ii)* abertura da boca de visita do tanque e instalação do sensor de segurança; *iii)* estacionamento seguro do caminhão tanque T₂; *iv)* operador com vestimenta de proteção química e cinto de segurança, após inspeção no caminhão-tanque T₁.

As entradas da função F₇ são: *i)* início da inspeção do veículo e tanque T₂; *ii)* abertura do bueiro e instalação do sensor de segurança; *iii)* Preencher a lista de verificação do caminhão tanque T₂, seguindo o estacionamento em segurança e a pré-condição do caminhão tanque T₂ estacionado em segurança. De acordo com a [Figura 14](#), esta análise resultou em tempo aceitável, precisão inaceitável, mas resultou em integração de duração inaceitável. Este resultado foi o mesmo com o ocorrido no acoplamento da saída do F₆ para a pré-condição do F₇. Houve um aumento significativo da variabilidade quando o outro caminhão tanque chega enquanto o primeiro estava parado, na área de descarga de ácido. A segurança, portanto, depende da habilidade e capacidade de tomada de decisão do operador.

4.7.5.1. Medidas de Controles Adotadas e Planejadas

Necessário observar as posições das travas de abertura dos caminhões tanques, pois alguns tem acionamento em direções diferentes, podendo ocasionar acidentes. Importante também criar um dispositivo de alarme a fim de restringir a abertura do *cap*, caso as válvulas de restrição de passagem do ácido para o mangote de descarga estejam abertas. Criar também um dispositivo que auxilie o preenchimento do *checklist* do item 2.4, conforme apresentado no item 4.5.4 com acesso visual do *checklist* e preenchimento sem necessitar da escrita pelo operador.

4.7.6. Resultados Analíticos da Variabilidade entre as Funções de Primeiro Plano F₇ e F₈

A análise da variabilidade do acoplamento da saída da função F₇ com a entrada da função F₈ resultou em acoplamentos críticos. Estas foram as entradas do F₈, indicadas na [Figura 14](#): *i)* ligação da bomba de transferência de ácido, iniciando o tanque de descarga T₂; *ii)* remoção da tampa e conexão da mangueira com engate rápido; *iii)* retirada das travas de travamento do caminhão tanque T₂, após inspeção do veículo; *iv)* e encher o caminhão tanque T₂. Houve um

aumento na variabilidade com tempo inaceitável e precisão aceitável, mas a duração com integração foi inaceitável.

4.7.6.1. Medidas de Controles Adotadas e Planejadas

As mesmas aplicadas no item 4.7.4.1.

4.7.7. Resultados Analíticos da Variabilidade entre as Funções de Primeiro Plano F₁₁ e F₁₂

A análise da variabilidade de acoplamento da saída do F₁₁ mais a entrada do F₁₂ e a pré-condição foi realizada, vinculada ao operador iniciando passos do *checklist* para liberação do caminhão tanque e a entrega das chaves ao motorista. A saída do F₁₁ foi, conforme indicada na [Figura 14](#): *i*) completar o item 4 do *checklist* verificando se todas as etapas foram realizadas no caminhão tanque T₁; *ii*) o caminhão tanque T₁ foi liberado com as válvulas e tampa superior fechadas. Como pré-condição do F₁₂, o primeiro caminhão tanque foi liberado com as válvulas e tampa superior fechadas e a lista de verificação foi preenchida pelo motorista. Este aumento na variabilidade é devido à característica temporal (ou fenótipo) e associação com a duração considerada crítica. O objetivo foi implementar medidas de controle para auxiliar o preenchimento da lista de verificação usando acesso visual, desobrigando o operador de escrever qualquer coisa. Se o formulário estiver incompleto, um alarme de aviso deve ser ativado. O item 4 do *checklist* encontra-se descrito no item 4.3 da função F₉. Devolver a chave ao motorista, solicitar ao mesmo que coloque a caminhão tanque próxima a sala de controle de descarregamento e efetuar o passo “*show me*” com o motorista, mostrando no campo que o caminhão tanque está liberado e com as válvulas e tampa superior devidamente fechadas, assinar o *checklist* todo preenchido juntamente com o motorista e liberar o veículo. A operação de retirada do caminhão tanque do pátio de descarregamento é de responsabilidade da transportadora, representada pelo motorista do caminhão.

4.7.7.1. Medidas de Controles Adotadas e Planejadas

Criar um dispositivo que auxilie o preenchimento do *checklist* do item 4 sem necessitar da escrita do operador, com acesso visual; e caso o preenchimento esteja incompleto, seja

acionado um alarme de aviso. Criou-se um procedimento adicional com acionamento da bomba por poucos minutos ao término da transferência a fim de evitar ácido residual. Na atividade de abertura da boca de visita foi instalado um sensor de segurança para controlar a abertura da boca de visita do caminhão tanque. O alarme precisa ser visual e sonoro para indicar a presença do sensor a fim de ser retirado na saída do caminhão tanque.

4.7.8. Funções Críticas Identificadas no Estudo da Variabilidade pelo FRAM

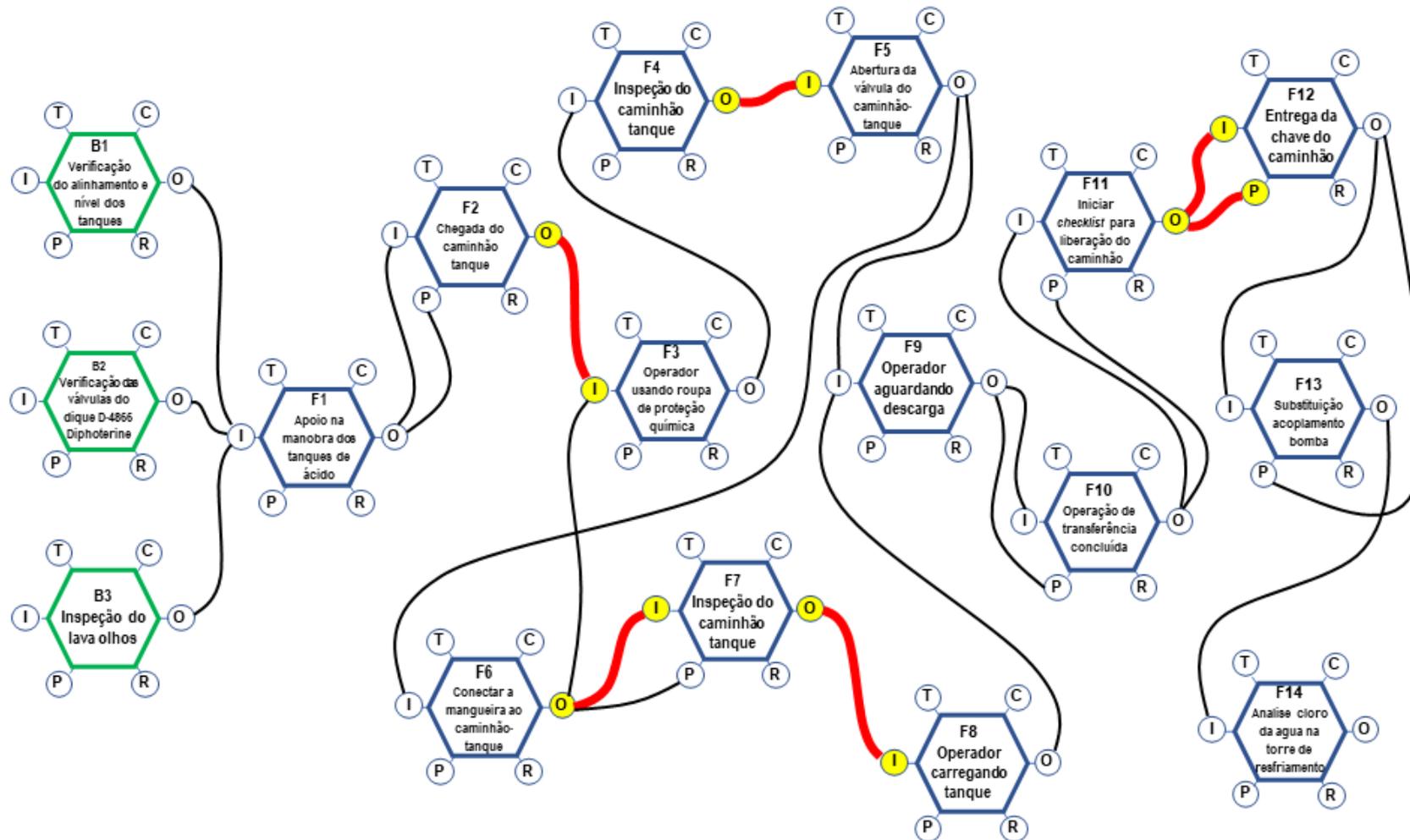
Uma análise do processo em bateladas mostrou as possibilidades de variabilidade para cada função. Esta instanciação de um modelo FRAM identificou acoplamentos entre funções críticas. Por exemplo, as variabilidades de funções ocorrem da saída da função F₂ para a entrada da função F₃ devido à dificuldade de usabilidade entre a escrita do *checklist* de inspeção quando o operador usa fechamento de proteção química e cinto de segurança. Já o acoplamento da saída F₄ com a entrada de F₅ ocorre devido à estação de projeto da área de descarga de ácido. As recomendações foram feitas e aceitas após este estudo. As variabilidades de funções ocorrem da saída da função F₆ para a entrada da função F₇ devido à dificuldade de usabilidade entre a escrita do *checklist* de inspeção quando o operador está usando fechamento de proteção química e o cinto de segurança. A habilidade e o conhecimento do operador são importantes quando dois caminhões tanque foram recebidos simultaneamente. O acoplamento da saída F₇ com as entradas da função F₈ ocorre devido à estação de projeto da área de descarga de ácido. O acoplamento da saída F₁₁ com as entradas F₁₂ ocorre devido à necessidade de controles da automação para completar o *checklist*.

A [Figura 16](#) abaixo representa os acoplamentos críticos, resultantes de saídas conflitantes com atividades críticas, atividades de gatilho e gargalos.

4.7.9. Análises de Contexto FAD com Base no Procedimento Operacional de uma Unidade de Descarga de Ácido

A escolha do procedimento operacional padrão obedeceu ao critério do padrão operacional como único contexto, representado na instanciação nominal descrita no início do capítulo.

Figura 16. Modelo FRAM da área de descarga ácida em estudo, apresentando os acoplamentos identificados como ressonantes mais significativos com uma linha vermelha, após a análise da variabilidade.



4.7.10. Escolha dos FADs que podem Afetar o Desempenho dos Operadores

Para cada contexto analisado é necessário ter uma classificação específica de FADs. Estes foram usados para representar contextos situacionais e causas que afetam o desempenho humano em diferentes sistemas (KIM *et al.*, 2003).

As atividades críticas identificadas foram baseadas na escolha de funções em que os fatores humanos críticos predominaram nas diferentes categorias selecionadas. A análise do processo sociotécnico por fatores humanos e os detalhes das funções dos questionários foram baseados no procedimento operacional padrão.

Quantificar a importância do FAD pode ajudar a identificar quais foram necessários para prever atividades críticas (DOUGHERTY, 1990). Todos os fatores que podem influenciar o desempenho humano, sejam eles tecnológicos, ambientais, organizacionais ou relacionados à Complexidade da Tarefa Humana (cognitiva e física), bem como as interações entre esses fatores são essenciais. Tais interações não servem apenas para evitar acidentes, mas para promover um ambiente operacional seguro e produtivo.

O FAD influencia o desempenho dos operadores no que diz respeito à segurança de suas ações e de suas tomadas de decisão. Eles descrevem não apenas a parte técnica do sistema, mas também aspectos relacionados às características dos operadores, seu ambiente de trabalho e outros aspectos organizacionais (GROTH *et al.*, 2012).

O uso da análise de tarefas permite identificar restrições operacionais como procedimentos, *design* de interface e comunicação, e verificar se há informações suficientes disponíveis para permitir que os operadores tomem decisões quando necessário (KIM *et al.* 2003). A participação dos operadores é fundamental, com a oportunidade de cada operador compartilhar sua experiência e conhecimento do dia a dia da área operacional.

Após a identificação de cada FAD, as interfaces devem ser modernizadas e o emprego e o *design* do local de trabalho melhorados. O supervisor saberá então onde concentrar mais recursos e que tipo de medidas de redução de risco deve ser implementadas.

Foram coletadas percepções de operadores profissionais experientes da empresa de fabricação de produtos químicos. Foram distribuídos 15 questionários, dos quais 11 foram preenchidos. A Tabela 5 mostra os resultados estatísticos do FAD para cada função, utilizando 55 FADs com base na classificação estabelecida para análise.

Tabela 5. Resultados estatísticos para média (*m*), desvio padrão (*s_d*), função de fundo (*B_i*), função de primeiro plano (*F_i*) dos graus de influência FAD.

Função	Categoria dos FADs								FAD	
	Organizacional		Tecnológica		Humana		Complexidade da Tarefa		<i>m</i>	<i>s_d</i>
	<i>m</i>	<i>s_d</i>	<i>m</i>	<i>s_d</i>	<i>m</i>	<i>s_d</i>	<i>m</i>	<i>s_d</i>		
B ₁	2,28	1,21	1,21	1,44	1,73	1,25	1,4	0,83	1,66	1,12
B ₂	2,06	1,22	1,11	1,34	1,81	0,91	1,41	0,91	1,6	1,06
B ₃	2,82	0,8	2,18	1,23	3,27	0,62	2,92	0,71	2,8	0,78
F ₁	3,11	0,81	2,42	1,09	3,26	0,63	2,95	0,71	2,94	0,76
F ₂	2,51	0,83	1,28	1,33	2,74	0,62	1,96	0,93	2,12	0,87
F ₃	2,4	1,05	1,1	1,31	2,3	0,83	1,57	1,08	1,84	1,03
F ₄	2,63	0,86	1,16	1,08	2,74	0,7	2,27	0,82	2,2	0,79
F ₅	2,54	0,62	1,51	0,99	2,9	0,33	2,29	0,75	2,31	0,42
F	2,6	0,42	1,09	0,87	2,86	0,52	2,24	0,48	2,2	0,4
F ₇	2,63	0,44	1,46	0,45	2,98	0,52	2,42	0,52	2,37	0,33
F ₈	2,7	0,48	1,63	0,39	2,92	0,64	2,55	0,63	2,45	0,44
F ₉	2,82	0,65	1,25	0,7	2,76	0,61	2,47	0,76	2,33	0,53
F ₁₀	2,41	0,85	0,79	0,65	2,71	1,07	1,82	0,64	1,93	0,66

4.5.11. Análise Sobre a Identificação das Atividades Críticas no Procedimento de Operação usando FAD Crítico por Indicadores

A **Tabela 6** mostra as funções listadas em ordem decrescente de criticidade. A função mais crítica é a função de primeiro plano F₁, que envolve a verificação dos procedimentos básicos de suporte antes de iniciar a primeira descarga de cada turno. A função menos crítica foi a função de fundo B₂, que envolve verificar se o dreno do dique está fechado antes de descarregar o primeiro caminhão tanque.

A **Tabela 6** apresentou uma maneira objetiva de demonstrar aonde os FADs impactam por categoria no processo de trabalho. Essas conclusões identificam as intervenções mais necessárias e imediatas a realizar através da vivência e opinião dos usuários do processo sociotécnico. O gráfico de perfil foi elaborado a fim de mostrar essas influências nas etapas do processo com uma visualização efetiva.

A **Figura 17** mostra no perfil do grau de influência dos fatores que afetam o desempenho das funções analisadas que os fatores humanos (físicos e cognitivos) apresentaram a maior influência, seguidos pelos fatores organizacionais, complexidade das tarefas e tecnológicos. Esse perfil demonstra a eficácia da análise sociotécnica baseada em fatores humanos. No

entanto, outros procedimentos matemáticos podem ser feitos para realizar uma análise semelhante (MENEZES *et al.*, 2021).

Tabela 6: Funções em ordem de criticidade, sendo B_i as funções de fundo e F_i as funções de primeiro plano.

Categoria dos FADs				
Organizacional	Tecnológica	Humana	Complexidade da Tarefa	FADs
F ₁	F ₁	B ₃	F ₁	F ₁
B ₃	B ₃	F ₁	B ₃	B ₃
F ₉	F ₈	F ₇	F ₈	F ₈
F ₈	F ₇	F ₆	F ₇	F ₇
F ₄	F ₅	F ₅	F ₉	F ₉
F ₇	F ₉	F ₈	F ₅	F ₅
F ₅	F ₆	F ₉	F ₄	F ₆
F ₆	F ₄	F ₄	F ₆	F ₄
F ₂	F ₂	F ₂	F ₂	F ₂
F ₁₀	B ₁	F ₁₀	F ₁₀	F ₁₀
F ₃	B ₂	F ₃	F ₃	F ₃
B ₁	F ₃	B ₂	B ₂	B ₁
B ₂	F ₁₀	B ₁	B ₁	B ₂

Vale destacar que na composição das funções do FAD (linha cheia), conforme mostra a [Figura 17](#), a maior influência é atribuída ao fator humano (◆), enquanto a menor participação é atribuída à categoria tecnológica (▲). Isso confirma a característica de um processo em bateladas, onde a gestão humana se sobrepõe à gestão por *software*, que é um FAD que pertence à categoria tecnológica. Uma contribuição significativa do aspecto comportamental validou o perfil do processo e fortaleceu a análise.

Os resultados da análise da instanciação FRAM do processo em bateladas e os resultados da identificação das funções críticas por fatores humanos foram comparados, conforme estabelecido na [Figura 9](#). A maioria das funções consideradas críticas pelo modelo FRAM foram identificados pelos operadores, com exceção do acoplamento F₁₁ para F₁₂ da [Figura 16](#). A integração dos três fenótipos temporais por tipo de função mostrou que a duração pode alterar a variabilidade de uma função no ambiente sociotécnico, processar e tornar certas funções críticas, mesmo quando o aspecto precisão é aceitável ou preciso.

As medidas de controle de segurança de processos devem sugerir maneiras de detectar e mitigar (indicadores de variabilidade, barreiras, *design* / modificação, etc.). Em caso de

resultados positivos inesperados, naturalmente, deve-se procurar maneiras de controlar ou amplificar a variabilidade, em vez de formas de aliviá-lo.

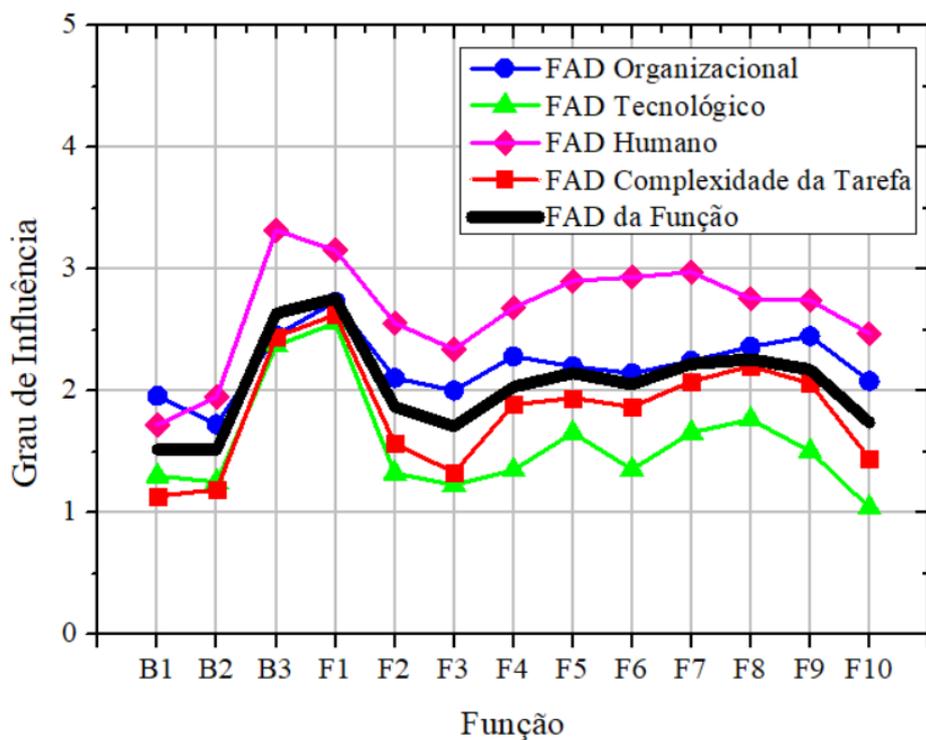


Figura 17. Perfil do grau de influência do FAD considerando as quatro categorias (organizacional ●; tecnológico ▲; humano ◆; complexidade da tarefa ■), mostrando a função do FAD enquanto uma linha cheia.

A metodologia apresentou que, com aplicação no estudo de caso, as situações críticas presentes no processo são do conhecimento coletivo, mas coexistem no dia a dia do processo. A partir da percepção dos operadores, análise e observação de especialistas, foi possível formalizar a necessidade de intervenção.

A grande importância desses resultados é que representam a integração analítica do FRAM e fatores humanos na identificação das atividades críticas. Através da aplicação do referencial metodológico de fatores humanos foi possível obter resultados consensuais com a participação construtiva dos usuários do processo sociotécnico.

Muitas vezes “gambiarras” ficam fazendo parte do dia a dia, face às adaptações e correções de manutenção não realizadas, e essas não aparecem nos procedimentos operacionais.



Figura 18. Atividade de inspeção do tanque, atividade esta sendo realizada na plataforma.

Por exemplo, na inspeção do tanque, a plataforma de recebimento dos caminhões tanques causava dificuldade de manuseio e movimentação, uma situação existente há anos, segundo os documentos levantados durante a análise metodológica proposta no Capítulo 3, e ilustrado na **Figura 18**. Na execução do trabalho de campo essa necessidade foi evidenciada, assim como outras atividades, onde foram colocados sensores para melhorar as condições de segurança do processo. A instalação de sensores na boca de visita do caminhão tanque foi outra contribuição dessa tese, servindo de nova medida de controle. Esta operação encontra-se ilustrada na **Figura 19** – note que o operador está vestindo os EPIs apropriados e usando os itens de segurança apontados na instanciação FRAM.



Figura 19. Operador abrindo a boca de visita, atividade esta de inspeção sendo realizada na plataforma.

Quando o trabalho foi realizado com a consulta da percepção dos operadores, houve uma contribuição da vivência desses profissionais com a memória técnica que está no imaginário coletivo, mas não é formalizado em documentos operacionais. O interessante é que, à medida que essas medidas de controle eram sugeridas (ou ainda executadas), quando aprovadas resultaram em consideráveis melhorias.

A seguir na [Tabela 7](#) apresentamos um resumo das medidas de controle sugeridas e muitas adotadas durante a elaboração do trabalho em campo com resultados positivos, especificamente a partir do item 4.5. Para cada acoplamento foram identificadas disfunções de processo e as medidas de controle específicas.

Tabela 7. Medidas de controle adotadas na área de descarregamento de ácido para algumas das funções destacadas nesta tese, vinculadas aos acoplamentos ressonantes mais significativos da Figura 16.

SAÍDA DA FUNÇÃO A JUSANTE F_i	ENTRADA DA FUNÇÃO A JUSANTE F_j	DISFUNÇÕES ENCONTRADAS	MEDIDAS DE CONTROLES ADOTADAS E PLANEJADAS
F_2 : Chegada do caminhão tanque T_1	F_3 : Operador vestindo roupa de proteção química e cinto de segurança	Preencher item 1 do <i>checklist</i> devido ao uso de EPIs e fardamento com luvas	Criar dispositivo que auxiliem preenchimento do <i>checklist</i> do item 1, com acessos visual e sem necessitar de escrita pelo operador.
F_4 : Inspeção do tanque e caminhão tanque T_1	F_5 : Operador iniciando a descarga do caminhão tanque T_1	Inspeção do veículo e preencher item 2.4 <i>checklist</i>	Na atividade de abertura da boca de visita foi instalado sensor de segurança para controlar a abertura da boca de visita do caminhão tanque. O alarme precisa ser visual e sonoro para indicar a presença do sensor a fim de ser retirado na saída do caminhão tanque.
		Ligando a bomba de transferência de ácido. Iniciando a descarga do caminhão tanque	Hoje o sistema de acionamento da bomba está automatizado com o acionamento de um dial pelo operador, e fechamento no término da transferência.
F_6 : Chegada do caminhão tanque T_2	F_7 : Inspeção do veículo e tanque do caminhão tanque T_2	Retirada do <i>cap</i> e conexão do mangote com engate rápido. Retirada das travas de fixação	Necessário observar as posições das travas de abertura dos caminhões tanques, pois alguns tem acionamento em direções, podendo ocasionar acidentes. Importante também criar dispositivo de alarme a fim de restringir a abertura do <i>cap</i> , caso as válvulas de restrição de passagem do ácido para o mangote de descarga estejam abertas.
		Inspeção do veículo e preencher item 2.4 <i>checklist</i> caminhão tanque T_2	Criar dispositivo que auxiliem preenchimento do <i>checklist</i> do item 2, com acesso visual do <i>checklist</i> e preenchimento sem necessitar escrita pelo operador.
F_7 : Inspeção do tanque e caminhão tanque T_2	F_8 : Operador iniciando a descarga do caminhão tanque T_2	Retirada do <i>cap</i> e conexão do mangote com engate rápido. Retirada das travas de fixação caminhão tanque T_2	Necessário observar as posições das travas de abertura dos caminhões tanques, pois alguns tem acionamento em direções, podendo ocasionar acidentes. Importante também criar dispositivo de alarme a fim de restringir a abertura do <i>cap</i> , caso as válvulas de restrição de passagem do ácido para o mangote de descarga estejam abertas
		Ligando a bomba de transferência de ácido. Iniciando a descarga caminhão tanque T_2	Necessário observar as posições das travas de abertura dos caminhões tanques, pois alguns tem acionamento em direções, podendo ocasionar acidentes. Importante também criar dispositivo de alarme a fim de restringir a abertura do <i>cap</i> , caso as válvulas de restrição de passagem do ácido para o mangote de descarga estejam abertas.
F_{11} : Operador iniciando passos do <i>checklist</i> para liberação do caminhão tanque T_1	F_{12} : Entrega das chaves ao motorista do caminhão tanque T_1 , aguardando retirada do caminhão tanque da baía para finalizar o passo <i>show-me</i>	Preenchimento do item 4 do <i>checklist</i> verificando se todas as etapas foram feitas	Criar dispositivo que auxilie preenchimento do <i>checklist</i> do item 4, com acesso visual do <i>checklist</i> e preenchimento sem necessitar escrita pelo operador
		Caminhão tanque T_1 está liberado com as válvulas e tampa superior fechadas e sem sensor, assinar o <i>checklist</i> todo preenchido juntamente com o motorista e liberar o veículo	Criou-se um procedimento adicional com acionamento da bomba por pequenos minutos ao termino da transferência a fim de evitar ácido residual no mangote.
			Na atividade de abertura da boca de visita foi instalado sensor de segurança para controlar a abertura da boca de visita do caminhão tanque. O alarme precisa ser visual e sonoro para indicar a presença do sensor a fim de ser retirado na saída do caminhão tanque.

A [Tabela 7](#) identifica as funções mais críticas que apresentaram ressonâncias significativas, vinculadas a [Figura 16](#). Abaixo, são detalhados os impactos que essas disfunções acrescentaram na variabilidade das atividades e na segurança de processo.

No acoplamento da função F₂ para função F₃, há necessidade de realizar uma *checklist* utilizando a proteção de segurança que são roupas e EPIs. A usabilidade no manuseio da prancheta e escrita em papel é bastante dificultada, ocasionando muitas vezes a execução dessa tarefa para depois da inspeção visual, o que já acarretou muitas falhas de esquecimento nas anotações e documentação de algumas informações importantes *a posteriori*. Essa ocorrência pode ser encontrada nos acoplamentos das funções de saída F₄ para F₅, saída F₆ para F₇, e saída F₁₁ para F₁₂. A sugestão da criação de dispositivo aonde fosse possível registrar os itens do *checklist* efetuado sem escrever foi uma solicitação identificada e validada pela percepção dos operadores.

No acoplamento da função F₄ para função F₅, a abertura da boca de visita e sua inspeção foi muito importante para o procedimento de segurança de processo. O ligamento da bomba de transferência também só deve ser realizado quando a boca de visita estiver aberta. Durante o trabalho de campo, um dispositivo de controle foi colocado a fim de controlar a associação desses dois procedimentos.

No acoplamento da função F₆ para função F₇, na retirada do *cap* para conexão do mangote com engate rápido, e em seguida a retirada das travas de fixação, observou-se que alguns caminhões tanques possuíam posições de acionamento diferentes das travas de abertura dos caminhões tanques, podendo ocasionar acidentes. Durante o trabalho de campo foi criado um dispositivo de alarme, a fim de restringir a abertura do *cap*, caso as válvulas de restrição de passagem do ácido para o mangote de descarga estejam abertas.

No acoplamento da função F₁₁ para função F₁₂, foi necessário identificar se houve o fechamento da boca visita que fica em cima do tanque, e se o sistema de engate do mangote de transferência foi desconectado. Alguns acidentes já ocorreram devido a esses procedimentos não terem sido verificados. A instalação do sensor visual e sonoro na boca de visita para controle da abertura retirou essa variabilidade, assim como o dispositivo instalado para controle do engate do mangote na transferência do ácido para os tanques.

5. Discussão Sobre os Resultados

Os resultados da análise do processo em batelada foram coincidentes ao considerar a análise da instanciação real o método FRAM, bem como a aplicação de fatores humanos na instanciação nominal com os resultados dos questionários distribuídos aos operadores para identificar funções críticas no processo. Apenas o acoplamento F_{11} para F_{12} da [Figura 16](#) não aparece como prioridade, comparando o modelo FRAM a aplicação dos FADs, nas respostas dos questionários identificados pelos operadores. A integração das três características temporais (fenótipos) por tipo de função mostrou que a duração, uma característica temporal, pode alterar a variabilidade de uma função no ambiente sociotécnico, processar e tornar certas funções críticas, mesmo quando a integração do aspecto de temporização e aspecto de precisão é aceitável ou preciso.

Para cada contexto analisado é necessário ter uma classificação específica de FAD. Estes foram usados para representar contextos situacionais e causas que afetam o desempenho humano em diferentes sistemas ([KIM et al., 2003](#)).

Nessa tese, três respostas fenotípicas, baseadas na linha analítica do método FRAM, foram integrados: tempo, precisão e duração. Estes são relevantes para definir possíveis interconexões, bem como a variabilidade para cada função em um sistema sociotécnico. [Macchi \(2010\)](#) realizou um estudo com uma representação agregada da variabilidade de desempenho, usando as características temporais de tempo e precisão. Dados ordinais foram propostos para representar o potencial de uma função para reduzir ou aumentar a variabilidade de desempenho, e a escolha da média como agregador. Essa tese integrou o fenótipo de duração e demonstrou que pode modificar a variabilidade do acoplamento, especificamente quando a duração é muito curta ou muito longa.

[Patriarca et al. \(2016\)](#) declararam que uma extensão natural para os outros fenótipos pode refinar a análise e não afeta a validade geral do método FRAM. [Liu et al. \(2017\)](#) criaram um recurso para identificar os FADs essenciais no processo. [Santos et al. \(2020\)](#) identificaram os fatores que afetam o desempenho dos operadores no processo. O diferencial dessa tese foi utilizar os FADs como indicadores críticos para selecionar as funções críticas por etapa do processo. Essa análise por etapa não havia sido realizada ainda, somente como foco no processo enquanto objeto ([FRANÇA, 2021](#); [SANTOS et al., 2020](#)).

Nessa tese, como inovação, analisou-se o processo por etapas da sequência de funções nas instanciações e não como um todo através de fatores humanos. Além de criar através da

licitação da opinião dos operadores por questionários, um processo de validação do método analítico FRAM com a redução da subjetividade analítica. Ao acrescentar a percepção dos usuários do processo sociotécnico, o resultado torna-se construtivo, participativo e consensual.

Outro achado importante foi a identificação da diferença do resultado da variabilidade entre os acoplamentos da saída de função anterior, com os componentes entrada, pré condição e recursos da função seguinte para os processos automatizados. O estudo demonstrou que o acoplamento entre o aspecto saída da função anterior nos aspectos da função a jusante, como entrada, pré-condição e recursos, tem diferentes consequências dependendo do tipo de processo. Em um processo automatizado, controlado por *software* supervisor, se condições operacionais não forem cumpridas, a continuação na execução do processo pode ser bloqueada, a menos que haja um procedimento no programa de gestão do *software* que contemple eventos alguns inesperados (MENEZES *et al.*, 2021). No entanto, em processos em bateladas, a tarefa de controle de gestão é realizada pelo mesmo indivíduo que realiza as modificações necessárias e adaptações, permitindo assim a continuidade do processo.

O estudo de contexto do processo utilizando FAD empregou uma classificação de pesquisa com base na literatura e, principalmente, foi construído de forma participativa, integrada e consensual por operadores e especialistas (KIM *et al.*, 2003; LIU *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2018; KYRIAKIDIS *et al.*, 2018). O estudo diferencial envolveu analisar o processo por cada função, o que possibilitou a identificação de funções críticas. Este tipo de análise mais detalhada, por função, não havíamos encontrado na literatura pesquisada, realçando assim outra inovação deste trabalho (SANTOS *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2017). A percepção dos operadores sobre as funções mais críticas foi comparada com o estudo da variabilidade utilizando o modelo FRAM e o resultado foi compatível, conforme publicado em Menezes *et al.* (2021). Os operadores, os quais participaram do estudo, possuíam treinamentos de ergonomia e confiabilidade humana (promovidos pela autora desta tese no local de trabalho), além de terem participado de estudo dirigido na escolha da taxonomia do contexto e dos FADs.

Na validação da abordagem estatística foi utilizado a média como parâmetro estatístico baseado em dois pilares: *a*) referências como Liu *et al.* (2017); e *b*) a Abordagem de Amostragem (Conveniência ou Amostragem Intencional). Tal análise forneceu uma matriz que, após ter as considerações de normalidade verificadas, permitiu usar a média como uma estatística válida e tratar os dados de modo a determinar os FADs mais influentes. É importante mencionar que uma vez que decidimos usar a escala Likert, sabíamos as limitações e interpretações diferentes da validade que o uso da média implicaria. Teóricos argumentam pró

e contras sobre este uso, e que foi lidado apropriadamente (MENEZES *et al.*, 2021). Tínhamos a opção de usar a mediana ou a mediana relativa para melhor explorar e extrair a opinião dos especialistas, mas a presente opção também pode ser considerada válida. O uso da escala Likert e a psicometria embutida nela são complexos e exigentes; são usualmente questionados, mas também são muito poderosos e frequentemente usados. Nosso método de amostragem pode ser considerado oportunista (*i.e.*, conveniente) e não aleatório; o tamanho da amostra não permitiu testes estatísticos sofisticados porque os *softwares* como SPSS não traduziu ou retornou valores válidos para uma amostragem pequena de dados, tornando inútil qualquer outra abordagem (MENEZES *et al.*, 2021).

A tese também demonstrou que nos processos em bateladas, o tempo de execução da tarefa pode ser afetado por uma mudança no sequenciamento das da função seguinte funções, bem como a competência do operador e o conhecimento do processo. Conforme comentado anteriormente, o sequenciamento das tarefas nos processos em bateladas pode ser afetado pela habilidade e experiência do operador. Este pode eliminar etapas, o que afeta na elaboração da instanciação do FRAM e a quantificação do tempo. Uma função pode ser eliminada na execução do processo. Há necessidade para elaboração da instanciação real a observação das atividades / funções no local onde os processos são realizados, as vezes em diferentes turnos e profissionais, a fim de oferecer informações diferenciadas para análise. Também é necessário que o analista monitore os operadores para ter o conhecimento necessário do processo. Ao quantificar o tempo das funções, foi identificado que nos processos envolvendo gestão humana, foram feitas adaptações as quais eliminou a variabilidade potencial; apesar de que, em processos gerenciados por *software* de supervisão, seja automatizado ou semiautomatizado, nem sempre é possível realizar adaptações, porque o tempo está dimensionado e é fator determinante na execução do processo.

A tese identificou que existem essas diferenças analíticas no estudo da variabilidade em processos automatizados e em bateladas para esses determinados componentes e também que o uso da metodologia do FADs, reduziu a subjetividade analítica. Questionários, com base numa taxonomia muito bem escolhida baseados em publicações científicas específicas, elaboradas por um estudo com os operadores, usuários do processo sociotécnico, auxiliou na escolha dos FADs para o processo analisado (KIM *et al.*, 2003; LIU *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2018; KYRIAKIDIS *et al.*, 2018). A identificação das funções mais críticas seguiu o critério da predominância de FADs chaves críticos. A resiliência do sistema depende do grau de

compreensão das interligações de seus componentes, e o método FRAM provou ser uma ferramenta bastante útil para medir essas interações sistêmicas.

O uso do método FRAM permitiu fornecer uma visão global do processo de produção a ser analisado, mapeando os acoplamentos das funções. O FRAM constrói um modelo detalhado do processo que explica as interconexões entre os componentes das funções. Neste estudo, identificamos quais funções foram as mais solicitadas e que podem causar gargalos ou atrasos, e essa visão macro foi importante para a análise da segurança do processo. A avaliação da variabilidade potencial de componentes da função, começando com a influência exógena ou endógena do contexto, incluindo a variabilidade de componentes por tipo de função, tecnológica, organizacional, e humana, entre outros, ajudou a indicar onde está a variabilidade potencial que pode causar desvios inseguros de procedimentos, permitindo que os ajustes apropriados sejam feitos.

A natureza abrangente do FRAM oferece várias oportunidades para combinar a metodologia FRAM com várias ferramentas e abordagens, permitindo assim a análise de problemas, mantendo uma perspectiva do sistema sociotécnico global (SANTOS *et al.* 2020). A base teórica do FRAM, combinada com a filosofia de estudar interações entre funções e interconexões, promoveu uma análise compreensível. A variabilidade é sensível em relação aos tipos de função e possíveis adaptações, principalmente em processos em bateladas, e vale reiterar que em um estudo FRAM, um sólido conhecimento do processo deve ser essencial.

Na tese confirmamos que a análise ergonômica do trabalho e os seus procedimentos de estudo do processo produtivo da função seguinte usados com o método FRAM, forneceu um suporte fundamental na construção da instanciação, além de um suporte analítico interpretativo. A ergonomia detalhou e expandiu a análise, mas o método FRAM e agregou ao estudo as interfaces operacionais só possíveis de serem reconhecidas pela observação do processo sendo realizado na área industrial. A utilização de fatores humanos através dos FADs acrescentou as percepções dos operadores, sendo, portanto, considerado um processo de validação bem sucedido.

As medidas de controle adotadas obedeceram ao critério da centralidade da análise e a construção participativa e consensual com as percepções dos usuários no processo sociotécnico analisado. Esse embasamento ofereceu suporte para tomadas de decisões objetivas e seguras, priorizando as mais críticas por ordem de intervenção

O processo de validação é uma fase importante na análise ergonômica do trabalho na ergonomia contemporânea que utiliza muito essa interpretação.

Durante a realização desse trabalho em campo, várias dessas medidas foram adotadas e analisadas com bons resultados. Algumas medidas foram melhoradas após testadas, como o sensor que comunicava se a boca de visita do tanque estava aberta quando o caminhão saía. Verificamos que devido ao ruído do ambiente de trabalho, nem sempre apenas o sinal sonoro era eficiente, e, portanto, foi acrescentado um sinal visual.

As medidas de controle desenvolvidas com a participação dos operadores nos questionários foram efetivas e validaram toda análise desenvolvida.

Apresentamos nesta tese maneiras de interpretar sistemas sociotécnicos pela integração de métodos e ferramentas que se completam. Há necessidade de tornar os sistemas tecnológicos cada vez mais seguros. Para sistemas que foram completamente especificados, a abordagem baseada em decomposição de subsistemas e argumentos de forma ordenada e lógica pode ser considerada bem-sucedida. Um conhecimento completo do funcionamento dos componentes dos sistemas permite a distinção entre as saídas corretas e incorretas bem como sua análise estrutural. Com a evolução tecnológica e organizacional dos sistemas industriais, a abordagem estrutural começou a manifestar os seus limites.

A complexidade e o acoplamento caracterizado na maioria dos domínios industriais modernos, com o aumento do uso de *softwares* e tecnologia da informação, e a maneira em que os sistemas sociotécnicos evoluíram, exigem a adoção de uma abordagem diferente para a segurança.

A abordagem ergonômica é ampla e interpretativa. A ergonomia, com seu estudo detalhado das atividades de processo, forneceu ao método FRAM recursos importantes como a definição de sequenciamentos diversos dentro de um mesmo processo. A identificação das funções principais e de apoio, e a quantificação do tempo real das atividades foi uma etapa decisiva na construção das instâncias do FRAM e sua posterior comparação, conforme ilustrado na [Figura 9](#).

A abordagem ergonômica possibilitou um estudo de contexto detalhado, fornecendo suporte para uma análise criteriosa com o método FRAM, descrita nesta tese e embasada na [Figura 8](#). A ergonomia expande e interpreta, e o FRAM engloba e fornece a visão necessária para se estudar as interligações e analisar os resultados de modo integrado.

A abordagem funcional, adotada pelo Método de Análise de Ressonância Funcional (FRAM), englobou todo processo produtivo de trabalho, dando uma visão de como as funções se acoplam e quais são as consequências resultantes, conforme ilustrado na [Figura 14](#), e detalhado no Capítulo 4. Ajudou a compreender não só como funções podem falhar, mas

também para descrever como as funções são realmente feitas para assegurar o funcionamento normal do sistema. A análise de desempenho normal, que pode ser e geralmente é diferente da sua descrição normativa, destaca as limitações de serem focadas exclusivamente em eventos negativos resultantes de desvios das regras e procedimentos prescritos.

O FRAM funciona de modo tal que uma função reverbera, ou ressoa, em outra(s). O resultado consiste numa trama de (inter)ligações única e completa, que se aproxima de um sistema sociotécnico real.

Apesar da aparente complexidade da estrutura do FRAM desenvolvida por [Hollnagel \(2012\)](#), este consegue reproduzir e mimetizar diversas situações extremamente complexas em termos bastante simples, conforme descritas em publicações científicas ([MENEZES et al., 2021](#)). Isto de fato reforça a ideia de um método em si, que consegue propor modelos para diversas situações e onde o foco está na interação entre as funções, mais do que nas atividades em si. De fato, uma pequena variação nas atividades pode se combinar com outra e ressoar, reverberando dentro do sistema em estudo.

Na análise do método FRAM, a subjetividade analítica foi mitigada com a participação das percepções dos operadores através de licitação dos questionários via uso dos FADs, outro resultado inovador da tese, que permitiu a vinculação de dois modos de análise de sistemas sociotécnicos, conforme apresentado na [Figura 9](#).

Os seres humanos são a única autoridade inteligente de um sistema sociotécnico; flexíveis, são capazes de ajustar os seus comportamentos para lidar com um sistema dinâmico. A identificação da contribuição positiva dos seres humanos para o sistema de segurança é indispensável nos estudos de sistemas complexos. Eles guardam memórias técnicas e vivências importantes nos estudos de confiabilidade dos sistemas sociotécnicos. A participação dos usuários dos sistemas através das suas percepções acrescentou e validou decisões fundamentadas.

A comparação das atividades críticas identificadas no modelo FRAM com atividades críticas encontradas pela análise metodológica via FADs permitiu abordar problemas complexos a partir de uma perspectiva humana, mantendo ao mesmo tempo um ambiente seguro, e uma relação técnica com as informações reais do processo fornecidos pelos usuários do sistema sociotécnico (conforme ilustrado na [Figura 9](#)).

Isto é uma abordagem inovadora que permite uma perspectiva alternativa sobre como a segurança do processo pode ser interpretada. Por meio da integração da abordagem ergonômica e do método FRAM, foi possível validar resultados com os usuários do processo produtivos.

Dessa forma, o estudo do processo segue a linha analítica interpretativa do método FRAM, tendo sido possível propor um processo de validação junto com fatores humanos.

Na aplicação dos questionários utilizando fatores humanos, as percepções dos usuários do processo sociotécnico são solicitadas. As respostas baseadas em fatores que afetam o desempenho humano escolhidos com uma taxonomia estudada por um grupo de profissionais conhecedores da área industrial e com treinamentos do conhecimento teórico científico conduziram a resultados objetivos práticos e eficientes.

Importante observar que a participação de usuários que detém esses conhecimentos com experiência na área industrial é fundamental para a eficácia dos resultados.

Na aplicação do método FRAM a análise fica concentrada na avaliação do analista e depende do seu conhecimento na área industrial e sua capacidade técnica de utilização do método FRAM. Ambos importantes para um resultado analítico eficaz.

O interessante é combinar e comparar esses dois resultados, como foi realizado na metodologia aplicada, a fim de validar os estudos. Na aplicação no estudo de caso nessa tese todos os requisitos foram contemplados, concluindo com resultados idênticos.

Concluimos que a análise do contexto, o conhecimento dos avaliadores e a participação dos usuários do processo sociotécnico construiu uma metodologia eficiente participativa e consensual.

Enfim a hipótese corroborou com os resultados finais obtidos na aplicação da metodologia. Concluiu-se que o FRAM é atualmente o método que mais atende o estudo dos sistemas sociotécnicos, e em constante aprimoramento, como os aspectos importantes detalhados na nossa metodologia. A maior evidência da efetividade da metodologia foi a coincidência das respostas dos operadores do processo analisado com a interpretação da análise do método FRAM, apenas acrescentando a utilização do recurso importante presente no método FRAM, da característica temporal, duração. Nessa tese houve contribuição significativa na evolução do método com a participação do criador do FRAM, Erik Hollnagel, que acompanhou a evolução das inovações.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento de práticas futuras, utilizando o FRAM em conjunto com outras ferramentas, podem servir para fortalecer o processo analítico sociotécnico em sistemas complexos. O acréscimo da consulta aos profissionais usuários do processo que utilizam e gerenciam o sistema sociotécnico é uma maneira de resgatar a memória técnica da empresa que muitas vezes não se encontra nos manuais operacionais. As mudanças de procedimento e adaptações muitas vezes ocorrem na área industrial, mas nem sempre são incluídas e descritas em manuais operacionais. Esse processo de validação analítico é interessante e objetivo quando estudado dentro do contexto correto com escolhas das categorias específicas dos FADs que irão compor a taxonomia em diversos outros ambientes industriais. Na atividade de exploração de petróleo existem várias possibilidades de realizar esse trabalho de investigação com contribuições efetivas da análise nesse setor em particular. Muitas das atividades são gerenciadas pelo ser humano ocasionando tomadas de decisões onde o potencial de variabilidade é grande devido a influência da experiência e habilidade dos operadores. Interessante analisar os processos automatizados, pois com o passar dos anos perdem a automação de alguns sensores e transformam em processos semiautomáticos, muito comum na indústria petroquímica.

A interação FRAM e ergonomia ocorre na quantificação de tempo das atividades sendo exercitadas com a observação das atividades nos locais de trabalho. O uso da quantificação do tempo por atividade da função seguinte torna possível acrescentar na metodologia, análise da exposição de saúde e higiene ocupacional nos estudos de processo (MENEZES *et al.*, 2022). O tempo quantificado nas atividades observadas pode avaliar os impactos na saúde ocupacional do trabalho nos operadores, e identificar as disfunções de processo. Esses acréscimos podem ser incluídos à metodologia apresentada na tese.

Como visto nesta tese, o modo interpretativo da segurança de processo, interagindo com os usuários, foi realizado por etapas, levando a resultados importantes de como o sistema é afetado por partes. Tais acréscimos poderão fornecer grandes contribuições na interpretação de muitos problemas sociotécnicos complexos. Exemplificando: quando na área industrial há perdas de sensores dos processos sem a devida reposição, ou quando há acréscimos de novos equipamentos na área sem integrar os *softwares* de gerenciamentos dos novos com os antigos, ou mesmo mudanças tecnológicas e organizacionais de profissionais de uma área para outra sem muito conhecimento técnico e vivência. Enfim, metodologia elaborada nesta tese

interpreta, engloba, analisa e sugere a construção de medidas de controle com a participação dos usuários do processo sociotécnico.

APÊNDICE 1

Tabela A. Indicadores FADs que compõem o Questionário.

Descrição do FAD	C	G
1 Disponibilidade de recursos: equipamentos, treinamento, pessoal qualificado	1	1
2 Treinamento de qualidade, experiência, abrangência, eficácia, validação de resultados	1	1
3 Número de metas e resolução de conflitos	1	1
4 Tempo de substituição de peças	1	2
5 Serviço de manutenção corretiva	1	2
6 Eficiência da manutenção preventiva	1	2
7 Gestão de segurança e cultura de segurança / práticas seguras e atualizações constantes	1	3
8 Liderança, habilidades de gestão	1	4
9 Atualização e disponibilização de procedimentos, planos e regras	1	5
10 Qualidade dos procedimentos, normas e regulamentos	1	5
11 Comunicação e cooperação	1	6
12 Mudança de padrão (horário de trabalho, pausas, tripulação)	1	6
13 Banco de dados e informações sobre manutenção, ocorrências de acidentes, informações atualizadas sobre equipamentos, plantas industriais atualizadas	2	1
14 Disponibilidade de recursos técnicos: ferramentas	2	1
15 Recursos de Comunicação: internet, intranet, walk talk, etc.	2	1
16 Apoio tecnológico em condições operacionais de trabalho	2	1
17 Manutenção preventiva	2	2
18 Dispositivos de controle em operação: Sensores, válvulas e indicadores de temperatura, pressão, volume, etc.	2	2
19 Software de controle supervisório eficiente com todos os equipamentos interligados	2	2
20 Falta de dispositivos de segurança em alguns equipamentos	2	2
21 Posto de trabalho inadequado para atividades operacionais	2	2
22 A indicação da informação muda ligeiramente ou não é relevante	2	2
23 Ambiguidade dos alarmes	2	2
24 Muita informação em monitores ou painéis	2	2
25 Vários equipamentos indisponíveis ou em funcionamento	2	3
26 Número de componentes acoplados	2	3
27 Mudança rápida dos parâmetros do sistema	2	3
28 Qualidade Treinamento, Experiência, Domínio, Eficácia, Competência, Validação de Resultados	3	1

29 Qualidade da Comunicação: clareza, eficácia	3	1
30 Falta de treinamento ou experiência limitada em novos equipamentos e softwares	3	1
31 Necessidade de maior intensidade de comunicação	3	2
32 Discussões externas necessárias com outros funcionários ou entidades externas	3	2
33 A comunicação é interrompida por ruídos e outras coisas	3	2
34 Móveis, estações de trabalho	3	3
35 Ruído, calor e iluminação na área operacional	3	3
36 Acessibilidade nas áreas operacionais	3	3
37 Layout e configuração inadequados do local de trabalho	3	3
38 Atividades com deslocamento ou levantamento de peso manual	3	3
39 Estresse no turno (23 x 07) h	3	3
40 Estresse no turno (07 x 15) h	3	3
41 Estresse no turno (15 x 23) h	3	3
42 Monotonia	4	1
43 A rotina	4	1
44 A complexidade da tarefa	4	1
45 Instruções de tarefas claras e objetivas	4	1
46 Número de metas simultâneas necessárias	4	1
47 Demanda para memorizar informações	4	1
48 Necessidade de integrar e combinar informações de diferentes partes do processo e sistemas de informação	4	1
49 É necessário um grande número de operações manuais	4	1
50 Necessidade de operações cuidadosas e precisas	4	1
51 Ações de controle operacional que requerem monitoramento e manipulação constantes	4	1
52 Tarefas simultâneas necessárias ou planejadas	4	1
53 Comunicação entre funcionários	4	1
54 Relações intrapessoais da equipe	4	1
55 Tempo de comunicação curto durante as trocas de turno	4	1

onde C significa categoria FAD e G, grupo FAD, respectivamente. 1: Organizacional; 2: Tecnológico; 3: Humano (Cognitivo e Físico); 4: Tarefa.

Received December 3, 2021, accepted December 13, 2021, date of publication December 14, 2021, date of current version December 29, 2021.

Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2021.3135747

Functional Resonance Analysis Method and Human Performance Factors Identifying Critical Functions in Chemical Process Safety

MARIA L. A. MENEZES¹, ASSED N. HADDAD², AND MARCIO L. F. NASCIMENTO¹

¹Graduate Program in Industrial Engineering, Polytechnic School, Federal University of Bahia, Salvador, Bahia 40210-630, Brazil

²Programa de Engenharia Ambiental, Polytechnic School, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 21941-909, Brazil

Corresponding author: Maria L. A. Menezes (orplanbahia@gmail.com)

This work was supported in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001. The works of A. N. Haddad and M.L.F. Nascimento were supported in part by the National Counsel of Technological and Scientific Development (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), Brazil. A. N. Haddad acknowledges Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), in special Grant 2019-E-26/202.568/2019 (245653).

ABSTRACT This study compared the results of the application of two different methodological frameworks to identify the critical functions in a chemical industry that affect process safety. The Functional Resonance Analysis Method (FRAM) and Performance Shaping Factors (PSF), the latter involving operators' active participation, were applied on the same socio-technical process. Three phenotype responses were integrated, based on FRAM, namely timing, precision, and duration. The ergonomics approach was used to identify process functions by observing the operator workday to FRAM. A methodological framework based on human factors had selected the critical key PSF, used as an indicator, to identify the critical activities in the process, by operator's perceptions. This study demonstrated that some result variability couplings can be different in some aspects in the automated and batch process. The integration of duration phenotypes with integration time and precision can modify the results of variability in the batch process. Human being management adapts and mitigates the risk. Operator competence and knowledge can eliminate function and task time by modifying the work sequence of the process. Comparison of analytical results demonstrated the compatibility of the two analyses.

INDEX TERMS Performance shaping factors (PSF), resilience engineering, functional resonance analysis method (FRAM).

I. INTRODUCTION

The technological development of computer software and machines to support human performance and decision-making necessitates a structured approach. Chemical processes involve substantial quantities of potentially dangerous materials, such as toxins, explosives, and flammable material that are exposed to extreme conditions as high temperature and/or pressure, which can lead to accidents with the loss of human life as well as incurring an economic cost [1].

The evolution of technology has been rapid in the industrial process and human beings are naturally affected. The social part of the system is of vital importance, meaning that not only the technical but also the complete

socio-technical structure, should be taken into account. Team members (managers, supervisors, operators, etc.) have to cope with heterogeneous and occasionally conflicting information, as well as the pressure to perform under the stress of a high workload [2].

This study analyzed information from the literature to better understand the advantages, disadvantages, and limitations of Human Reliability Analysis (HRA) tools and their applications [3], [4] and to review multiple methods used in HRA. As an HRA example, Functional Resonance Analysis Method (FRAM) is a method that places greater emphasis on interactions that could easily be overlooked with other methods. Hollnagel [5] declared that the FRAM method differs from others because its purpose is to produce a description of how a system works; FRAM's purpose is not to find a cause but to describe what should have happened for the work to succeed.

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Lorenzo Ciani¹.

Received 26 August 2022, accepted 28 September 2022, date of publication 10 October 2022, date of current version 19 October 2022.

Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2022.3213045


 RESEARCH ARTICLE

Practical Application of Ergonomic Methodology Identifying Critical Activities in a Metallurgical Electrolysis Unit

MARIA L. A. MENEZES¹, ASSED N. HADDAD², AND MARCIO L. F. NASCIMENTO¹

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Polytechnic School, Federal University of Bahia, Salvador, Bahia 40210-630, Brazil

²Programa de Engenharia Ambiental, Polytechnic School, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 21941-909, Brazil

Corresponding author: Maria L. A. Menezes (orplanbahia@gmail.com)

This work was supported in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior—Brasil (CAPES)—Finance Code 001. The work of Assed N. Haddad and Marcio L. F. Nascimento were supported in part by the National Council of Technological and Scientific Development (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), Brazil. The work of Assed N. Haddad was supported by the Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), in special Grant 2019-E-26/202.568/2019 (245653).

ABSTRACT This work presents a multidisciplinary methodology for the identification of critical activities in an industrial process utilizing task time quantification techniques present in ergonomic analysis and involving the participation of socio-technical users. It involved an activity analysis that focused on the individual workers' functions and behavior when carrying out their tasks in a metallurgy electrolysis unit. The choice of critical activities was based on levels of exposure to occupational, environmental and operational health risks present during the working period. The methodology identified critical activities that put both the health and safety of the workers at risk. The operators' participatory and constructive approach reduced analytical subjectivity, providing consensual conclusions. Questionnaires were used to produce a pain map that sought to analyze the stress placed on the workers' musculoskeletal system as a consequence of performing their activities. The quantification of time in the operator's workday identified the criticality of exposure to occupational health risks associated with the operational procedure. A process validation was reached, which integrated a postural and kinesiological analysis with the operators' perceptions according to their responses to questionnaires. As a result of the analysis undertaken in this work it was also possible to identify an increase in deformities present in copper cathodes and a corresponding increase in on-time activities to remove them that had led to production losses as well as worker discomfort. The methodology, which included the operators' opinions and perceptions, concluded with a process validation. This work describes a set of proposed metrics based on ergonomic principles.

INDEX TERMS Ergonomic work, human factors, occupational health, complex systems, task time.

I. INTRODUCTION

Ergonomics research covers two broad domains: the first involves human skills and limitations as well as human-machine system interaction, and the second involves methodologies [1]. This article demonstrates how ergonomics research can be applied to work situations and shows the transition from theory to industry practice with optimized results.

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Liang-Bi Chen .

The focus of the majority of ergonomics research concerns the identification of users' needs. It provides an analytical view with practical results to identify critical activities in the research work relating to a specific process [1].

This article focuses on occupational health problems in the electrolysis area of a metallurgical industrial unit that were subsequently analyzed by a multidisciplinary team. An increase in such operator health problems led us to investigate exposure to occupational health risks. The methodology involved the application of a process validation with

REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, Sondipon et al. Human reliability analysis: a review and critique. 2021.
- ÅHMAN, Jens. Analysis of interdependencies within the firefighting function on an offshore platform. LUTVDG/TVBB, 2013.
- ALM, H. Dukibuk: Functional Resonance Accident Model ienvårdrelateradkontext. Linköpings universitet, Sweden, 2008.
- ALVARENGA, M. A. B.; E MELO, PF Frutuoso; FONSECA, R. A. A critical review of methods and models for evaluating organizational factors in Human Reliability Analysis. *Progress in Nuclear Energy*, v. 75, p. 25-41, 2014.
- ANNETT, John; STANTON, Neville Anthony (Ed.). Task analysis. CRC Press, 2000.
- BARANZINI, D.; CHRISTOU, M. D. Human factors data traceability and analysis in the European Community's Major Accident Reporting System. *Cognition, Technology & Work*, v. 12, n. 1, p. 1-12, 2010.
- BELL, Julie; HOLROYD, Justin. Review of human reliability assessment methods. *Health & Safety Laboratory*, v. 78, 2009.
- BELMONTE, Fabien et al. Interdisciplinary safety analysis of complex socio-technological systems based on the functional resonance accident model: An application to railway trafficsupervision. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 96, n. 2, p. 237-249, 2011.
- BERGQVIST, P. et al. Utvärdering av Functional Resonance Accident Model genom en analys av ett lokalt postcenter (Evaluation of the FRAM in An Analysis of a Local Mail Distribution Centre). University of Linköping, Sweden, 2007.
- BORING, Ronald L. How many performance shaping factors are necessary for human reliability analysis? Idaho National Lab. (INL), Idaho Falls, ID (United States), 2010.
- BULLEMER, Peter; LABERGE, Jason C. Common operations failure modes in the process industries. *Journal of loss prevention in the process industries*, v. 23, n. 6, p. 928-935, 2010.
- CARAYON, Pascale et al. Advancing a sociotechnical systems approach to workplace safety—developing the conceptual framework. *Ergonomics*, v. 58, n. 4, p. 548-564, 2015.
- DE CARVALHO, Paulo Victor Rodrigues. The use of Functional Resonance Analysis Method (FRAM) in a mid-air collision to understand some characteristics of the air traffic management system resilience. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 96, n. 11, p. 1482-1498, 2011.

- DOS SANTOS, Isaac JA Luquetti et al. Allocation of performance shaping factors in the risk assessment of an offshore installation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 64, p. 104085, 2020.
- DOUGHERTY, Ed M. Human reliability analysis-where shouldst thou turn? *Reliability engineering & systems safety*, v. 29, n. 3, p. 283-299, 1990.
- EKANEM, Nsimah J.; MOSLEH, Ali; SHEN, Song-Hua. Phoenix—a model-based human reliability analysis methodology: qualitative analysis procedure. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 145, p. 301-315, 2016.
- FIGUEIRÔA FILHO, Celso Luiz Santiago et al. The effect of psychotropic drugs as a performance influencing factor on human reliability assessment. *IEEE Access*, v. 8, p. 80654-80672, 2020.
- FLACH, John M. et al. Striving for safety: communicating and deciding in sociotechnical systems. *Ergonomics*, v. 58, n. 4, p. 615-634, 2015.
- FORESTER, John et al. The international HRA empirical study: lessons learned from comparing HRA methods predictions to HAMMLAB simulator data. Office of Nuclear Regulatory Research, United States Nuclear Regulatory Commission, 2014.
- FRANÇA, Josué EM et al. FRAM AHP approach to analyse offshore oil well drilling and construction focused on human factors. *Cognition, Technology & Work*, v. 22, p. 653-665, 2020.
- FREITAS, L. R; BROCCHI, E. A. Digestão Sulfúrica de Materiais à Base de Titânio. *Anais do ENTMME 2015*, 17-30.
- FROST, Brendon; MO, J. P. System hazard analysis of a complex socio-technical system: the functional resonance analysis method in hazard identification. In: *Proc. of Australian System Safety Conference*, Melbourne Australia. 2014. p. 28-30.
- GROTH, Katrina M.; MOSLEH, Ali. A data-informed PIF hierarchy for model-based human reliability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 108, p. 154-174, 2012.
- GROTH, Katrina M.; MOSLEH, Ali. A data-informed PIF hierarchy for model-based human reliability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 108, p. 154-174, 2012.
- HEBEDA, M; LUQUETTI DOS SANTOS, Isaac Jose Antonio. Análise Ergonômica do Trabalho no Centro de Operações de Energia de uma Empresa Brasileira de Óleo, Gás e Energia. *Monografia UFF*, Rio de Janeiro, 2012.

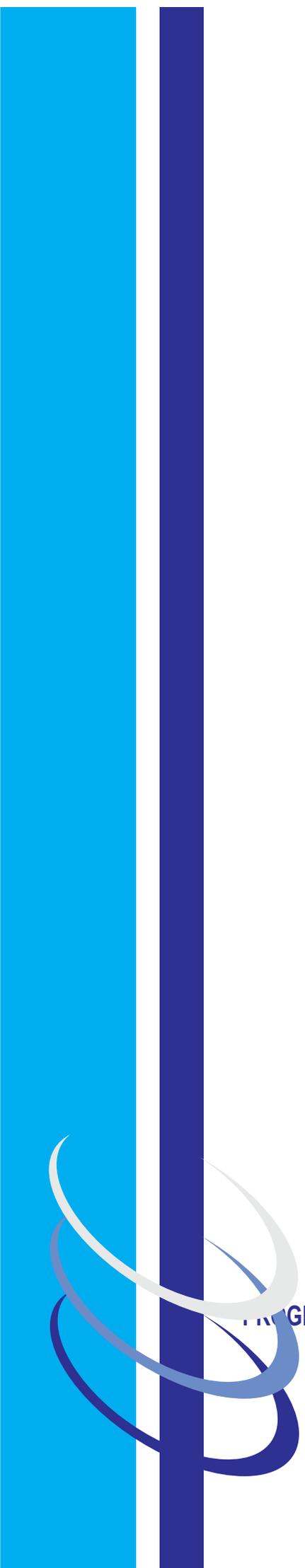
- HOLLNAGEL, Erik et al. Analysis of Comair flight 5191 with the functional resonance accident model. In: 8th International symposium of the Australian aviation psychology association. 2008. p. 8-11.
- HOLLNAGEL, Erik. A tale of two safeties. *Nuclear Safety and Simulation*, v. 4, n. 1, p. 1-9, 2013.
- HOLLNAGEL, Erik. An Application of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to Risk Assessment of Organisational Change. 2012.
- HOLLNAGEL, Erik. Barriers and accident prevention. Routledge, 2016.
- HOLLNAGEL, Erik. Cognitive reliability and error analysis method (CREAM). Elsevier, 1998.
- HOLLNAGEL, Erik. FRAM: the functional resonance analysis method: modelling complex socio-technical systems. Crc Press, 2017.
- HOLLNAGEL, Erik. Safety–I and safety–II: the past and future of safety management. CRC press, 2018.
- HOLLNAGEL, Erik. The ETTO Principle–Efficiency-Thoroughness Trade-Off. Adelshot UK: Ashgate, 2009.
- HOLLNAGEL, Erik; FUJITA, Yushi. The Fukushima disaster–systemic failures as the lack of resilience. *Nuclear Engineering and Technology*, v. 45, n. 1, p. 13-20, 2013.
- HOLLNAGEL, Erik; WOODS, David D.; LEVESON, Nancy (Ed.). Resilience engineering: Concepts and precepts. Ashgate Publishing, Ltd., 2006.
- JENSEN, Anders; AVEN, Terje. A new definition of complexity in a risk analysis setting. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 171, p. 169-173, 2018.
- JOHANSEN, Inger Lise; RAUSAND, Marvin. Defining complexity for risk assessment of sociotechnical systems: A conceptual framework. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, v. 228, n. 3, p. 272-290, 2014.
- KAZMIERCZAK, Karolina et al. Observer reliability of industrial activity analysis based on video recordings. *International journal of industrial ergonomics*, v. 36, n. 3, p. 275-282, 2006.
- KIM, Jae W.; JUNG, Wondea. A taxonomy of performance influencing factors for human reliability analysis of emergency tasks. *Journal of loss prevention in the process industries*, v. 16, n. 6, p. 479-495, 2003.

- KYRIAKIDIS, Miltos et al. Understanding human performance in sociotechnical systems—Steps towards a generic framework. *Safety science*, v. 107, p. 202-215, 2018.
- LEVESON, Nancy et al. Engineering resilience into safety-critical systems. In: *Resilience engineering*. CRC Press, 2017. p. 95-123.
- LI, Peng-cheng et al. A new organization-oriented technique of human error analysis in digital NPPs: Model and classification framework. *Annals of Nuclear Energy*, v. 120, p. 48-61, 2018.
- LIU, Peng et al. Conceptualizing performance shaping factors in main control rooms of nuclear power plants: a preliminary study. In: *International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. Springer, Cham, 2016. p. 322-333.
- LIU, Peng et al. Identifying key performance shaping factors in digital main control rooms of nuclear power plants: A risk-based approach. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 167, p. 264-275, 2017.
- LIU, Peng; LI, Zhizhong. Human error data collection and comparison with predictions by SPAR-H. *Risk Analysis*, v. 34, n. 9, p. 1706-1719, 2014.
- LUNDBLAD, K.; SPEZIALI, J. FRAM for Nuclear Power (Heavy Loads. FRAM in an NPP). University of Linköping, Sweden, 2007.
- LUNDBLAD, Karin et al. FRAM as a risk assessment method for nuclear fuel transportation. In: *Proceedings of the 4th International Conference Working on Safety*. 2008. p. 223-1.
- MACCHI, Luigi. A Resilience Engineering approach for the evaluation of performance variability: development and application of the Functional Resonance Analysis Method for air traffic management safety assessment to cite this version: HAL Id: pastel-00589633 1' Écol. 2011.
- MACKAY, Robert S. Nonlinearity in complexity science. *Nonlinearity*, v. 21, n. 12, p. T273, 2008.
- MATHIESEN, H. A.; ALM, H.; SANDSTEDT, E. En FRAM-analys av läkemedelshanteringen på Apoteket (A FRAM Analysis of Handling of Medicine at a Pharmacy). University of Linköping, Sweden, 2008.
- MCDONALD, N. Organizational Resilience and Industrial Risk. In: *Hollnagel, E., Woods, DD, Leveson, N.* 2006.
- MENEZES, Maria de Lourdes; LUQUETTI DOS SANTOS, Isaac Jose Antonio. AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TRABALHO NO SETOR INDUSTRIAL: UMA

- ABORDAGEM CENTRADA NA ERGONOMIA FÍSICA E ORGANIZACIONAL DO TRABALHO. *Revista Ação Ergonômica*, v. 9, n. 2, 2014.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Norma Regulamentadora 17 – Ergonomia. Brasília, 2022.
- MOSLEH, Ali; CHANG, Y. H. Model-based human reliability analysis: prospects and requirements. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 83, n. 2, p. 241-253, 2004.
- NEA. A Compendium of Practices on Safety Improvements in Low-Power and Shutdown Operating Modes, OECD Publishing, Paris, 1997.
- NEA. Improving Low Power and Shutdown PSA Methods and Data to Permit Better Risk Comparison and Trade-off Decision Making - Responses to the COOPRA Survey, OECD Publishing, Paris, 2005.
- OXSTRAND, Johanna. Human reliability guidance-How to increase the synergies between human reliability, human factors, and system design and engineering. Phase 2: The American Point of View-Insights of how the US nuclear industry works with human reliability analysis. 2010.
- PATRIARCA, Riccardo et al. Resilience engineering: Current status of the research and future challenges. *Safety Science*, v. 102, p. 79-100, 2018.
- PATRIARCA, Riccardo; BERGSTRÖM, Johan; DI GRAVIO, Giulio. Defining the functional resonance analysis space: Combining Abstraction Hierarchy and FRAM. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 165, p. 34-46, 2017.
- PATRIARCA, Riccardo; DI GRAVIO, Giulio; COSTANTINO, Francesco. A Monte Carlo evolution of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to assess performance variability in complex systems. *Safety science*, v. 91, p. 49-60, 2017.
- PEREIRA, Ana GAA. Introduction to the use of FRAM on the effectiveness assessment of a radiopharmaceutical dispatches process. 2013.
- PRAETORIUS, Gesa; HOLLNAGEL, Erik; DAHLMAN, Joakim. Modelling Vessel Traffic Service to understand resilience in everyday operations. *Reliability engineering & system safety*, v. 141, p. 10-21, 2015.
- RAE, Andrew; ALEXANDER, Rob; MCDERMID, John. Fixing the cracks in the crystal ball: a maturity model for quantitative risk assessment. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 125, p. 67-81, 2014.
- RASMUSSEN, Jens. Risk management in a dynamic society: a modelling problem. *Safety science*, v. 27, n. 2-3, p. 183-213, 1997.

- RAUSAND, Marvin. Preliminary hazard analysis. Norwegian University of Science and Technology, 2005.
- RODRÍGUEZ, Manuel; DÍAZ, Ismael. A systematic and integral hazards analysis technique applied to the process industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 43, p. 721-729, 2016.
- RUNTE, Eduardo FA. Productivity and safety: adjustments at work in socio-technical system. 2010. Tese de Doutorado. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- SAWARAGI, SAWARAGI, T.; HORIGUCHI, Y.; HINA, A. Safety analysis of systemic accidents triggered by performance deviation. 2006 SICE-ICASE International Joint Conference, n. C, p. 1778–1781, 2006.
- SETTI, E. Apostila de Análise Ergonômica do Trabalho I, Rio de Janeiro, agosto de 2002.
- SHIRALI, G. A. et al. Proactive risk assessment to identify emergent risks using functional resonance analysis method (FRAM): A case study in an oil process unit. *Iran Occupational Health*, v. 10, n. 6, p. 33-46, 2013.
- SLIM, Hussein; NADEAU, Sylvie. A mixed rough sets/fuzzy logic approach for modelling systemic performance variability with FRAM. *Sustainability*, v. 12, n. 5, p. 1918, 2020.
- SONNERFJORD, Daniel. En systemanalys av flygtrafikledningstjänst med hjälp av FRAM. 2011.
- STEEN, Riana; AVEN, Terje. A risk perspective suitable for resilience engineering. *Safety science*, v. 49, n. 2, p. 292-297, 2011.
- STRAUCH, Barry. Investigating human error: Incidents, accidents, and complex systems (1st ed.). Routledge, 2004.
- SUJAN, Mark-Alexander; FELICI, Massimo. Combining failure mode and functional resonance analyses in healthcare settings. In: International conference on computer safety, reliability, and security. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. p. 364-375.
- SWUSTE, Paul; FRIJTERS, Adri; GULDENMUND, Frank. Is it possible to influence safety in the building sector? A literature review extending from 1980 until the present. *Safety science*, v. 50, n. 5, p. 1333-1343, 2012.
- TARRANTS, William Eugene. The measurement of safety performance. 1980.
- WHALEY, April Marie. Cognitive basis for human reliability analysis. US Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, 2016.
- WISNER, Alain. A inteligência no trabalho: textos selecionados de ergonomia. In: A inteligência no trabalho: textos selecionados de Ergonomia. 1994. p. 190-190.

- WISNER, Alain. Quand voyagent les usines: essai d'anthropotechnologie. Syros, 1985.
- WOLTJER, Rogier. A systemic functional resonance analysis of the Alaska Airlines flight 261 accident. *Human Factors and Economic Aspects on Safety*, p. 83, 2006.
- WOLTJER, Rogier. Resilience assessment based on models of functional resonance. In: *Proceedings of the 3rd Symposium on Resilience Engineering*. Paris: Mines-ParisTech, 2008.
- WOLTJER, Rogier; HOLLNAGEL, Erik. Functional modeling for risk assessment of automation in a changing air traffic management environment. In: *Proceedings of the 4th international conference working on safety*. 2008.
- WOLTJER, Rogier; HOLLNAGEL, Erik. Modelling and evaluation of air traffic management automation using the functional resonance analysis method. 2008.
- WOLTJER, Rogier; HOLLNAGEL, Erik. The Alaska Airlines flight 261 accident: a systemic analysis of functional resonance. In: *2007 International Symposium on Aviation Psychology*. 2007. p. 763.
- WOLTJER, Rogier; PRYTZ, Erik; SMITH, Kip. Functional modeling of agile command and control. In: *14th International Command and Control Research and Technology Symposium*, Washington DC, USA June 15-17, 2009. DOD CCRP, 2009.
- WOLTJER, Rogier; SMITH, Kip; HOLLNAGEL, Erik. Constraint recognition and state space representation in collaborative distributed command and control. *Human Factors and Economic Aspects on Safety*, p. 72, 2007.
- WOODS, David D. Essential characteristics of resilience. In: *Resilience engineering*. CRC Press, 2017. p. 21-34.
- WOODS, David D.; COOK, Richard I. Mistaking error. *Patient safety handbook*, v. 95, p. 108, 2003.
- YANG, Qibo; TIAN, Jin; ZHAO, Tingdi. Safety is an emergent property: Illustrating functional resonance in Air Traffic Management with formal verification. *Safety science*, v. 93, p. 162-177, 2017.

A decorative graphic on the left side of the page consists of two vertical bars: a wide light blue one on the left and a narrower dark blue one on the right. Below these bars is an abstract graphic of three overlapping, curved lines in shades of blue and white, resembling a stylized 'P' or a dynamic swirl.

UFBA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

Rua Aristides Novis, 02, 6º andar, Federação, Salvador BA

CEP: 40.210-630

Telefone: (71) 3283-9800

E-mail: pei@ufba.br

Home page: <http://www.pei.ufba.br>