



UFBA

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

MESTRADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

JOSÉ FILIPE MICHEL GAGLIANO FERREIRA

ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE COMPRESSÃO
DE CO₂ NUMA PLANTA PETROQUÍMICA CONSIDERANDO
OS FATORES TÉCNICO- OPERACIONAIS E HUMANOS



SALVADOR
2018



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

JOSÉ FILIPE MICHEL GAGLIANO FERREIRA

**Análise da confiabilidade do sistema de compressão de CO₂
numa planta petroquímica considerando os fatores técnico-
operacionais e humanos**

Salvador
2018

JOSÉ FILIPE MICHEL GAGLIANO FERREIRA

**ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE
COMPRESSÃO DE CO₂ NUMA PLANTA PETROQUÍMICA
CONSIDERANDO OS FATORES TÉCNICO-
OPERACIONAIS E HUMANOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Industrial

Orientadores: Prof. Silvio Alexandre Beisl Vieira de Melo
Prof. Salvador Ávila Filho

Salvador
2018

Ferreira, José Filipe Michel Gagliano

Análise da confiabilidade do sistema de compressão de CO₂ numa planta petroquímica considerando os fatores técnico-operacionais e humanos./

José Filipe Michel Gagliano Ferreira – Salvador, 2018

128 p. : il.

Orientador: Prof. Silvio Alexandre Beisl Vieira de Melo

Coorientador: Prof. Salvador Ávila Filho

Dissertação (Mestrado - Engenharia Industrial) -- Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica - Universidade Federal da Bahia, 2018.


1.análise de falha. 2.sistema complexo. 3.confabilidade. I. Melo, Silvio Alexandre Beisl Vieira de. II.Filho, Salvador Ávila. III.Título.

**ANÁLISE DA CONFLABILIDADE DO SISTEMA DE COMPRESSÃO DE CO₂
NUMA PLANTA PETROQUÍMICA CONSIDERANDO OS FATORES TÉCNICO-
OPERACIONAIS E HUMANOS**

JOSÉ FILIPE MICHEL GAGLIANO FERREIRA

Dissertação 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 mestre em Engenharia Industrial.

Examinada por:

Profa. Dra. Karla Patrícia Santos Oliveira Rodriguez Esquerre 
Doutora em Engenharia Química, pela Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 2003.

Prof. Dr. Ângelo Márcio Oliveira Sant'anna 
Doutor em Engenharia de Produção, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2009.

Prof. Dr. Acires Dias 
Doutor em Engenharia Mecânica, pela Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 1996.

Salvador, BA - BRASIL.
Fevereiro/2018

Aos meus pais, Katia e Roberto.
À minha irmã, Franciane.
À minha filha, L. Sophie.
À Yully, minha esposa.
À meu tio Giovanni

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecer a Deus por me proporcionar esta incrível experiência de construção de conhecimento, de amadurecimento profissional e pessoal.

Agradeço a toda minha família, em especial minha mãe e irmã, por sempre me apoiarem e acreditarem no sucesso da pesquisa.

Agradeço ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial (PEI) por depositar a confiança em mim para poder contribuir com a ciência e sociedade, e por fornecer a estrutura e meios imprescindíveis para a realização da pesquisa.

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo auxílio financeiro concedido.

Agradeço aos meus orientadores pela orientação, dedicação e ensinamentos.

Agradeço aos queridos colegas do Grupo de Risco Operacional Dinâmico (GRODyn) ao qual faço parte, pela parceria, compartilhamento de conhecimento e pelos laços fraternos que foram construídos ao longo dessa jornada.

Agradeço aos colegas do Grupo de Incerteza (GI-UFBa), pela atenção e auxílio disponibilizado que tanto foi fundamental na pesquisa, em especial ao professor Daniel Diniz Santana.

Agradeço aos tantos outros que foram partícipes na construção do conhecimento e motivadores para finalização deste trabalho.

Agradeço a empresa parceira que permitiu o desenvolvimento deste trabalho, disponibilizando tempo dos profissionais, permitindo visitas e coletas de dados.

Agradeço a Liliane por sua extrema dedicação na coleta dos dados e acolhimento na empresa. Essa dedicação foi fundamental para o sucesso dessa pesquisa.

Resumo da Dissertação apresentada à UFBA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

O presente trabalho tem por objetivo analisar os aspectos sociotécnicos que afetam a continuidade operacional através de um estudo de caso com aplicação de ferramentas da confiabilidade. Para alcançar tal objetivo, esta dissertação foi dividida em quatro etapas: análise preliminar para delimitação do objeto de estudo através do mapeamento da perda de produção, análise do ambiente operacional, estudo das falhas através do diagrama de Ishikawa e da aplicação da confiabilidade para modelagem da taxa de falha, e a aplicação do método SPAR-H (do inglês, *Standardized Plant Analysis Risk Human*) para quantificação do erro humano em uma tarefa crítica da operação. Foi analisado o ambiente industrial de uma planta petroquímica de fabricação de fertilizantes. Devido às próprias características de complexidade do sistema foram identificados elementos de natureza não técnica (humanos e organizacionais) que influenciam o desempenho das operações e contribuem no processo de desenvolvimento de falhas. Neste ambiente, o nível de automação apresentou-se como um fator limitante na caracterização da falha no formato sociotécnico.

Palavras-chave: análise de falha, sistema complexo, confiabilidade.

Abstract of the Master Thesis presented to PEI/UFBA as part of the requirements needed to obtain the degree of Master in Science (M.Sc.).

The present work aims to analyze the socio-technical aspects that affect the operational continuity through a case study with the application of reliability tools. To achieve this objective, this dissertation was divided into four stages: preliminary analysis to delimit the object of study through the mapping of production loss, analysis of the operational environment, study of the failures through the Ishikawa diagram and the application of the reliability for modeling the failure rate, and the application of the SPAR-H (Standardized Plant Analysis Human Risk) method to quantify human error in a critical task of the operation. The industrial environment of a petrochemical fertilizer manufacturing plant was analyzed. Due to the complexity characteristics of the system, non-technical elements (human and organizational) have been identified that influence the performance of operations and contribute to the process of developing failures. In this environment, the level of automation was presented as a limiting factor in the characterization of the failure in the sociotechnical format.

Keywords: failure analysis; complex system; reliability tools.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração da diferença entre <i>failure</i> , <i>fault</i> e <i>error</i>	26
Figura 2 – Exemplo de degradação de um sistema.	27
Figura 3 – Tendência da participação de causas humanas e técnicas em falhas de sistemas..	29
Figura 4 – Estrutura organizacional proposta.....	35
Figura 5 – Evolução dos modelos de causalidade de acidente.	37
Figura 6 – Versão mais recente do modelo do “Queijo Suíço” de Reason.	38
Figura 7 – Resumo dos estágios envolvidos no acidente organizacional.....	40
Figura 8 – Digital das Falhas.....	42
Figura 9 – Exemplificação da relação entre fatores que originam um evento indesejado.	43
Figura 10 – Probabilidade de erro humano como uma função da influência do PSF.	48
Figura 11 – Fluxograma das atividades da metodologia.	51
Figura 12 – Metodologia utilizada na primeira etapa.....	54
Figura 13 – Diagrama de blocos do mapeamento de perda para delimitação do objeto de estudo.....	54
Figura 14 – Modelo do diagrama de Ishikawa ou diagrama de causa e efeito.....	56
Figura 15 – Diagrama de bloco da etapa da análise de confiabilidade.	59
Figura 16 – Metodologia utilizada para o cálculo da taxa de erro humano.	61
Figura 17 – Processo industrial simplificado de fabricação da ureia.	63
Figura 18 – Sistema de compressão de CO ₂	66
Figura 19 – Fluxo de CO ₂ no compressor alternativo.	68
Figura 20 – Perda de produção por grupo.	71
Figura 21 – Representação gráfica de equivalentes dias de perda da produção.....	72
Figura 22 – Representação gráfica da perda de produção dos equipamentos rotativos.	73
Figura 23 – Representação gráfica da perda de produção por classe de equipamento rotativo.	74
Figura 24 – Região de busca da função objetivo da distribuição Weibull.	91
Figura 25 – Região de busca da função objetivo da distribuição normal.....	92
Figura 26 – Região de Abrangência dos modelos Weibull e normal.	94
Figura 27 – Função taxa de falha da distribuição normal e Weibull.....	95
Figura B. 1 – Principais causas de parada do compressor alternativo de CO ₂ (C-02).	119
Figura C. 1 – Principais causas de ruído e vibração do compressor alternativo de CO ₂ (C-02)	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Pressão e temperatura de sucção e descarga nos quatro estágios.....	67
Quadro 2 – Aspectos de SMS e potenciais riscos.	78
Quadro A. 1 – Resumo de descrições do termo falha (<i>failure</i>) encontrado na literatura.....	118
Quadro D. 1 – Relação de causa de efeito dos principais fatores que afetam o compressor alternativo C-02.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pressão e temperatura de sucção e descarga nos quatro estágios.	67
Tabela 2 – Tempos entre falhas do compressor alternativo C-02.	90
Tabela 3 – Valores dos parâmetros estimados e as variâncias e incertezas de cada modelo. .	90
Tabela 4 – Resultados do teste χ^2 e do coeficiente de determinação.....	93
Tabela 5 – Matriz de covariância e de correlação para a distribuição Weibull e normal.....	93
Tabela 6 – Multiplicadores do PSF considerando um cenário mais brando.....	102
Tabela 7 – Multiplicadores do PSF considerando um cenário mais negativo.....	102
Tabela A. 1 – Avaliação de cada PSF para tarefa de ação	128
Tabela B. 1 – Avaliação de cada PSF para tarefa de diagnóstico.....	129

LISTA DE SÍMBOLOS

χ^2	Distribuição de probabilidade chi quadrado, p. 58
β	Parâmetro de forma da função weibull, p. 90
η	Parâmetro de escala da função weibull, p. 90
μ	Parâmetro da função normal – em confiabilidade também representa o tempo médio entre falha, p. 90
σ	Parâmetro da função normal, p. 90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACH	Análise de Confiabilidade Humana
AGR	Água de Refrigeração
AICHE	<i>American Institute of Chemical Engineers</i>
ASEP	<i>Accident Sequence Evaluation Program</i>
ASP HRA	<i>Accident Sequence Precursor Human Reliability Analysis</i>
CBO	Classificação Brasileira de Ocupações
EE	Eventos Externos
EI	Eventos Internos
EQ	Equipamentos
FG	Folga
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
GRV	Greve
HEP	<i>Human Error Probability</i>
HFACS	<i>Human Factors Analysis and Classification System</i>
ICAM	<i>Incident Cause Analysis Method</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MCC	Manutenção Centrada em Confiabilidade
NHEP	<i>Nominal Human Error Probability</i>
PP	Paradas Programadas
PSF	<i>Performance Shaping Factor</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
SC	Suprimento da Carga
SCM	<i>Swiss Cheese Model</i>
SMS	Segurança, Meio Ambiente e Saúde
SPAR-H	<i>Standardized Plant Analysis Risk Human</i>
TEF	Tempo Entre Falhas
TER	Tempo Entre Reparos
THERP	<i>Technique for Human Error Rate Prediction</i>
UTL	Utilidades
WLS	<i>Weighted Least Squares</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivos Específicos	19
1.2 JUSTIFICATIVA	19
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 ABORDAGEM SOBRE FALHA EM SISTEMA TÉCNICO	24
2.1.1 Causas de Falhas	27
2.2 FATORES LATENTES DA FALHA	29
2.2.1 Complexidade em Sistema Sociotécnico	31
2.2.2 O Erro Humano	33
2.3 VISÃO SISTÊMICA DA FALHA	34
2.4 FERRAMENTAS DE CONFIABILIDADE PARA ANÁLISE DE FALHA	44
2.4.1 Confiabilidade Operacional	44
2.4.2 Confiabilidade Humana – Método SPAR-H	46
2.4.2.1 Fatores de desempenho humano do Método SPAR-H	47
2.4.2.2 Quantificação da probabilidade do erro humano	49
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1 METODOLOGIA PROPOSTA	51
3.1.1 Etapa 1 – Análise Preliminar	53
3.1.2 Etapa 2 – Análise da Tarefa (Contexto Operacional)	55
3.1.3 Etapa 3 – Diagrama de Ishikawa e Confiabilidade de Componentes	56
3.1.3.1 Diagrama de Ishikawa	56
3.1.3.2 Confiabilidade de componentes	57
3.1.4 Etapa 4 – Confiabilidade Humana	59
CAPÍTULO 4. CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	62
4.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO	62
4.2 SISTEMA DE COMPRESSÃO DO CO ₂	65
4.2.1 Compressor Alternativo de Pistão Horizontal – Funcionamento e Características	66
CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	70

5.1	ETAPA 1: MAPEAMENTO DE PERDA DA PRODUÇÃO	70
5.2	ETAPA 2: ANÁLISE DA TAREFA (CONTEXTO OPERACIONAL)	74
5.2.1	Descrição do Posto de Trabalho	75
5.2.1.1	Operação normal	76
5.2.1.2	Partida/Parada do compressor	77
5.2.2	Aspectos de SMS	78
5.2.3	Análise da Complexidade da Tarefa do Sistema de Compressão	79
5.2.3.1	Cumprimento de procedimentos operacionais padrão	79
5.2.3.2	Automação do sistema	79
5.2.3.3	Caracterização dos sistemas auxiliares	80
5.2.3.4	Nível de atenção desviada – sistema principal vs. sistema auxiliar	82
5.2.3.5	Nível de linhas de reciclo	83
5.2.4	Considerações Finais	83
5.3	ETAPA 3: ANÁLISE DE FALHAS EM SISTEMA TÉCNICO	85
5.3.1	Diagrama de Ishikawa	85
5.3.2	Análise da Confiabilidade	89
5.3.3	Considerações Finais	95
5.4	ETAPA 4: ANÁLISE DA CONFIABILIDADE HUMANA (SPAR-H)	96
5.4.1	Tarefa de Partida do Compressor	97
5.4.2	Análise dos PSFs	98
5.4.3	Cálculo da Probabilidade do Erro Humano	102
5.4.4	Considerações Finais	103
	CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	105
6.1	CONCLUSÕES	105
6.2	SUGESTÕES	107
	REFERÊNCIAS	109
	GLOSSÁRIO	116
	APÊNDICE A	118
	APÊNDICE B	119
	APÊNDICE C	120
	APÊNDICE D	121
	APÊNDICE E	122

APÊNDICE F	123
APÊNDICE G	124
APÊNDICE H	125
APÊNDICE I	126
ANEXO A	128
ANEXO B	129

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

O ambiente dinâmico e de elevada competitividade imposto pelo mercado globalizado exige que as organizações se esforcem não apenas pela qualidade, mas também pelo comprometimento com o meio ambiente, com o social e com a legislação para garantir a continuidade dos negócios. Com o desenvolvimento tecnológico houve um aumento da produção, mas também aumentou a complexidade dos sistemas e organizações (JOHNSEN; KILSKAR; FOSSUM, 2017). Consequentemente, os eventos indesejados se tornaram cada vez mais sérios e ameaçadores da sustentabilidade da organização.

Em uma unidade de processamento, espera-se que equipamentos e sistemas desempenhem suas funções conforme o projetado para atender às exigências da produção. No entanto, não importa quão boa seja a estratégia de manutenção e operação, sistemas e equipamentos falham (AHMED; KHAN; AHMED, 2014). Oliveira, Paiva e Almeida (2010, apud SLACK, 2002) declaram que, embora nenhum sistema seja indiferente às falhas, em alguns casos a falha não é uma opção, pois pode resultar em eventos catastróficos. Portanto, à medida que se desenvolvem processos de alto risco e complexidade, mais esforços são necessários para a prevenção de falhas e para a melhoria do controle das unidades.

O diagnóstico precoce de perturbações no processo, de mau funcionamento de equipamentos e de outros eventos indesejados desempenha um papel importante em termos de segurança, assim como melhora a eficiência de processos/equipamentos e proporciona melhores resultados na garantia da qualidade do produto (GALICIA; HE; WANG, 2012). Nesse sentido, várias técnicas foram difundidas, como, por exemplo, a Análise dos Modos e Efeitos de Falhas (FMEA – acrônimo em inglês), Análise de Árvore de Falha (FTA – acrônimo em inglês), Diagrama de Causa e Efeito, Diagrama de Pareto, Cinco Porquês, entre outras.

Apesar da disponibilidade dessas técnicas, nem sempre a análise realizada tem o aprofundamento que possibilite o acesso à causa raiz. Na maioria dos casos, quando as causas imediatas do problema são conhecidas, a investigação é finalizada. Essas causas, quando relacionadas a uma falha em equipamentos ou processo, são denominadas causas físicas – ruptura mecânica de componentes e corrosão são alguns exemplos.

No entanto, outros fatores, como os relacionados ao homem e à organização, são constantemente negligenciados no processo de investigação, impedindo a construção de barreiras mais eficazes. Segundo Bhaumik (2009), as falhas não “simplesmente acontecem”,

mas frequentemente “são causadas”, e a identificação da causa gera o aprendizado organizacional que ajuda a evitar sua recorrência no futuro. Por esta visão, a questão da ocorrência das falhas ganha uma nova dimensão, a interação homem-máquina-ambiente, e torna o processo de investigação complexo e desafiador.

Os aspectos humano-organizacionais vêm sendo amplamente estudado por inúmeros acadêmicos tanto na área de ciências humanas, tais como psicologia – Stenberg Junior (2008), Muchinsky (2004), e sociologia do trabalho – Perrow (1984), quanto na área de ciências exatas, notadamente as engenharias – Embrey (2000), Reason (2016). O resultado desses esforços resultou no desenvolvimento de várias técnicas que auxiliam a quantificação da probabilidade de erro humano, bem como identificação dos fatores que influenciam no desempenho de suas atividades.

A inclusão desses aspectos em um processo de investigação geralmente é realizada quando se quer encontrar as causas básicas de um acidente, que resultou em mortes ou em grande impacto ambiental, ou ainda quando se quer estabelecer as barreiras de proteção em atividades de alto risco. Por outro lado, os impactos de um evento indesejado podem ter natureza diversa, isto é, as perdas podem ser materiais, humanas ou de qualidade, ou ainda podem estar relacionadas com a perda de tempo, de energia e de imagem. Em um cenário de restrições ambientais, as perdas relacionadas à energia podem representar um entrave ao funcionamento de instalações industriais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O tema deste trabalho baseia-se na concepção de que nas indústrias com processos de alta complexidade, como é o caso de indústria química, petroquímica e nuclear, as anormalidades operam de forma sistêmica, interligando as áreas de processo, de qualidade, de segurança e de manutenção. Os eventos indesejados muitas vezes emitem sinais de falhas que passam despercebidos pelo *staff*, pois não possuem em sua rotina uma leitura adequada e/ou o registro correto desses sinais. Portanto, esse cenário sugere que um incidente resultante de uma falha pode ter suas origens em questões técnicas, humanas e/ou organizacionais.

Com base nessa perspectiva, este trabalho tem por objetivo principal analisar aspectos sociotécnicos que ocasionam a interrupção de operação através de um estudo de caso com

aplicação de ferramentas da confiabilidade. Essa análise foi realizada em uma indústria petroquímica considerada de alta complexidade e de alto risco.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Apresentar as discussões sobre a caracterização da falha no formato sociotécnico em sistema complexo.
- Identificar um sistema crítico (equipamento rotativo) com base no mapeamento das perdas de produção e analisar os fatores sociotécnicos responsáveis por influenciar em seu desempenho;
- Analisar o ambiente operacional de uma indústria petroquímica, para identificação de influências no desempenho das atividades;
- Calcular a probabilidade de ocorrência de erros humanos no contexto do estudo de caso da indústria petroquímica escolhida.

1.2 JUSTIFICATIVA

O tratamento adequado das falhas pretende diminuir as perturbações no processo, aumentar o seu controle e garantir conformidade dos processos/produtos por meio da prática de gestão da qualidade. O desenvolvimento de novos processos e produtos trouxe riscos que provocaram a necessidade de estabelecimento de sistemas de gestão semelhantes ao da qualidade (por exemplo, o TQM, a ISO 9001 e *Six Sigma*), principalmente nas áreas de meio ambiente (ISO 14001), segurança e saúde ocupacional (OHSAS 18001 e ISO 45001). Atualmente, existem diversos sistemas de gestão que tratam diferentes temáticas, como, por exemplo, risco (ISO 31000), eficiência energética (ISO 50001), responsabilidade social (ISO 26000), entre outros.

Como forma de atender às pressões externa (sociedade, governo, sócios/acionistas, clientes/mercado), ou por iniciativa própria, é comum que as organizações implantem não apenas um, mas vários sistemas de gestão à medida que são demandadas. O resultado do reconhecimento da necessidade de implantação de tais sistemas é verificado pelo drástico aumento do número de certificações desde o final da década de 1990. Dados divulgados pela ISO - *International Organization for Standardization* revelam que um total de 1,519,952

certificações foram conferidas aos mais variados setores industriais em todo o mundo em 2015 (ISO, 2015).

A difusão dos sistemas de gestão é uma demonstração do empenho das organizações na busca de garantir a qualidade do produto/serviço, preservar o meio ambiente e estabelecer um ambiente de trabalho adequado à realização das atividades. No entanto, é pertinente realizar os seguintes questionamentos:

- Como é possível que algumas organizações tenham um investimento considerável na construção de mecanismos de controle, mas ainda assim eventos indesejados persistam em causar grandes prejuízos às empresas, clientes e população?
- Qual a dimensão dos impactos frente ao ambiente atual de incerteza?

Considerando a particularidade de cada caso, uma das possíveis explicações para os questionamentos é que existe uma dificuldade de realizar uma análise sistêmica do processo e de compreender que o risco operacional é dinâmico. Buscam-se soluções para evitar o acontecimento da falha física (falha de equipamento), no entanto, faz-se necessário entender que a direção da causa raiz compreende uma análise integrada do ambiente, do indivíduo e do processo.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está dividido em seis capítulos, um glossário, nove apêndices e dois anexos. Neste primeiro capítulo, é introduzido o tema deste trabalho, apresentado a justificativa, o objetivo geral e os específicos.

O Capítulo 2, intitulado Fundamentação Teórica e Revisão da Literatura, traz as principais discussões da literatura sobre o tema “análise de falhas em sistema complexo”. Para melhor compreensão, este capítulo foi subdividido em quatro subtemas: (i) abordagem sobre falhas em sistema técnico; (ii) fatores latentes da falha; (iii) visão sistêmica da falha; e (iv) ferramentas de confiabilidade para análise de falhas. Este capítulo é complementado por um apêndice e dois anexos. O apêndice A trata de definições da literatura do termo falha (*failure*). Os anexos tratam de avaliação dos níveis de Fatores de Desempenho Humano (PSF – acrônimo em inglês) para tarefas de ação (Anexo A) e para tarefas de diagnóstico (Anexo B).

O Capítulo 3 apresenta a metodologia geral utilizada para alcançar os objetivos deste trabalho, assim como as metodologias específicas para cada técnica empregada.

O Capítulo 4 descreve o ambiente industrial onde foi realizado o estudo de caso. Nesse capítulo é apresentado uma visão geral do processo de produção da unidade petroquímica abordada.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e está dividido de acordo com a metodologia utilizada: (i) mapeamento de perdas para identificação do equipamento crítico; (ii) análise do ambiente operacional; (iii) construção do diagrama de Ishikawa e estudo da confiabilidade para modelagem da taxa de falha; e (iv) a quantificação da taxa do erro humano através do método SPAR-H (*Standardized Plant Analysis Risk Human*). Este capítulo é complementado por sete apêndices (B até H), assim estruturado:

- Apêndices B e C trazem as representações dos diagramas de Ishikawa das potenciais causas de falha que afetam o equipamento em estudo;
- Apêndice D apresenta um quadro com a relação de causa e efeito dos principais elementos que afetam o equipamento e o processo;
- Apêndices E e F apresentam os resultados dos testes de resíduo das distribuições analisadas;
- Apêndices G e H apresentam o roteiro dos formulários utilizados nas entrevistas.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros, e o Apêndice I apresenta as publicações decorrentes do desenvolvimento deste trabalho.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O desenvolvimento acelerado de novas tecnologias tem aumentado a complexidade dos processos de produção e contribuído para elevar a interdependência dos equipamentos industriais (WANG; YIN; WANG, 2009), de forma que não basta conhecer os impactos das falhas, é necessário compreender os fenômenos que levam à causa dos eventos, a fim de assegurar a eficácia das medidas de controle. Portanto, a análise de falha possui um papel significativo em diversos setores industriais, pois torna-se extremamente útil para a melhoria da segurança e saúde ocupacional, controle da qualidade, continuidade operacional, gestão de risco, desenvolvimento de produto, entre outras.

Segundo French et al. (2011), sistemas complexos nunca são 100 % confiáveis. As relações existentes entre homem, máquina, fatores ambientais e organizacionais são elementos chaves que intensificam as interdependências entre sistemas e tornam a questão da gestão ainda mais desafiadora.

Desde a revolução industrial, os acidentes tornaram-se cada vez mais graves (CHENG; HWANG, 2015). A partir da década de 60, em que as indústrias química, petrolífera e petroquímica experimentaram grandes mudanças – as condições de funcionamento do processo (pressão e temperatura) se tornaram mais severas; a energia armazenada no processo aumentou, elevando o risco; as plantas cresceram em capacidade de produção; e o aumento da interligação com outras plantas (LEES, 2005). Estes fatores contribuíram para aumentar o grau de dificuldade de operação e de controle dos processos.

Lees (2005) ainda acrescenta que no passado as plantas não apresentavam tanta complexidade, sendo as tarefas de partida e parada, por exemplo, realizadas com maior facilidade. Com o aumento da complexidade das instalações, as atividades tornaram-se de maior risco e representando um maior potencial de perda tanto humana, quanto econômica.

Essas perdas podem ocorrer de diversas formas. O mais lógico a se pensar são nos grandes acidentes (evento topo ou sinistro). A história é marcada por vários acidentes paradigmáticos, entre os quais: Seveso (Itália, 1976), Bhopal (Índia, 1984), Chernobyl (Ucrânia, 1986), Plataforma Piper Alpha (Mar do Norte, 1988), e Fukushima (Japão, 2011). Mas as perdas devido a situações como atrasos no comissionamento e tempo de inatividade no funcionamento também são importantes (LEES, 2005).

Identificar os fatores responsáveis por cada incidente é uma condição mínima para evitar que outros eventos semelhantes se repitam. Na maioria dos casos de grandes acidentes,

a questão do erro humano ainda permanece como um fator contribuinte crítico e por isso tem ganhado destaque nos estudos de identificação da causa raiz e estabelecimento de barreiras de proteção. Uma resposta para diminuir tais riscos foi o uso extensivo de processos automatizados (CHENG; HWANG, 2015).

Nas últimas décadas, a questão da automação (controle de processo e sistema instrumentado de segurança) teve enorme avanço, trazendo consigo inúmeras vantagens, principalmente nas indústrias de processos contínuos. Na prática, a introdução de sistemas automatizados visa substituir a ação humana ao reduzi-la ao mínimo possível, garantindo respostas mais rápidas ao sistema. Atividades rotineiras, como, por exemplo, o abrir e fechar de uma válvula de um sistema de alta pressão, que geralmente era controlado manualmente por operadores, agora é realizado de forma mais eficaz e segura com o auxílio de computadores e *softwares*.

No entanto, na concepção dos sistemas, frequentemente assume-se que o operador não dará comandos errôneos, ou que, se ele o faz, então não é culpa do sistema (JOHNSON, 1996). Segundo Cacciabue (2004), a automação, apesar de seus benefícios, gera uma variedade de questões críticas de segurança devido ao que ele classifica como erros de cognição. Fatores como treinamento e experiência, ambiente de trabalho físico, equipe de trabalho etc., são fortemente afetados pelo contexto sociotécnico e geralmente não são levados em consideração no projeto de sistemas de tecnologia avançada. Além disso, Cacciabue (2004) alerta para o fato de ser impossível conceber uma planta “livre de erro humano”.

Desde que as falhas tornaram os eventos mais severos, vários modelos de causalidade foram desenvolvidos para auxiliar na construção de barreiras de proteção. Rasmussen (1983), Perrow (1984), Embrey (2000), Hollnagel (2010), Reason (2016) e Ávila Filho (2017) são alguns dos pesquisadores que vêm destinando esforços para compreender os fenômenos envolvidos por trás das falhas. French et al. (2011; apud PERROW, 1984) acrescenta que falhas são uma consequência inevitável do aumento da complexidade do sistema. Já na visão de Ávila Filho e Dias (2017), a consideração da natureza sociotécnica do sistema e a compreensão de que o risco é dinâmico são elementos importantes em estudos de contenção da falha e/ou mitigação dos seus efeitos. Seja qual for o caso, independentemente das melhores práticas e estratégias de manutenção e de operação, ou dos avanços tecnológico do sistema, as falhas acontecem.

Para Ávila Filho (2014) a visão gerencial mais moderna deve seguir o pensamento do risco dinâmico. Nesta abordagem, a dinâmica do risco não está necessariamente relacionado com a variável tempo. Ávila Filho afirma que alterações do risco (daí a sua caracterização em dinâmico) se deve a mudanças relacionadas com os fatores humanos, organizacionais (clima organizacional, liderança etc.), variáveis ambientais, complexidade do processo e da tarefa. Dessa forma, se faz necessário revisar as técnicas atuais para incluir esses aspectos. Nesse sentido, Sakurada (2013) introduz o conceito de confiabilidade dinâmica, onde a modelagem proposta leva em consideração a variável tempo e as influências humanas nas mudanças de estado de operação para sistema falho.

Falhas são comuns no meio organizacional, mas nem sempre seus resultados são catastróficos – explosão, liberação de nuvens tóxicas, perda humana, danos irreparáveis à propriedade, perda de energia etc. Porém, tais resultados em sua maioria implicam em alguma perda econômico-financeira.

Realizar uma investigação ao ponto de identificar causas básicas para estabelecer ações mais eficazes pode não ser uma tarefa fácil, pois, a depender da situação, exigirá análises multidisciplinares (HEUT, 2000). Por exemplo, compreender os mecanismos de uma falha mecânica em um componente crítico poderá requerer *expertises* de muitas disciplinas da engenharia, tais como materiais, térmica, mecânica dos fluidos, e de outras áreas como estatística, fatores humanos e psicologia.

A discussão que envolve o processo de investigação de falhas geralmente está relacionada aos casos de acidentes e à área de gestão de risco. Já sua aplicação no campo operacional para redução de interrupção de operação, que não necessariamente resulta em acidente, ainda é pouco discutida na literatura.

2.1 ABORDAGEM SOBRE FALHA EM SISTEMA TÉCNICO

A aplicação de técnicas de análise de falhas se estende a diversas áreas. Apesar de sua grande utilização na área de risco e investigação de acidentes, atualmente a análise de falhas possui relevância para a prática de manutenção e operação em sistemas de alto risco, como a indústria aeroespacial e as indústrias de processo, como a de plantas químicas, petroquímica, nuclear, entre outras. Tal aplicabilidade resulta em uma intensa discussão sobre o tema devido à dificuldade de conciliar definições e terminologias utilizadas tanto na academia quanto na prática industrial.

Apesar de existirem muitos trabalhos científicos relacionados ao processo de falha, poucos trabalhos acadêmicos realizam uma abordagem sobre as terminologias utilizadas nessa área. Ter uma noção clara das terminologias não é apenas uma questão de linguagem. Em sistemas que requerem alta confiabilidade, saber diferenciar falha e defeito tem grande influência na modelagem do comportamento de componentes, podendo gerar interpretações que não traduzem a realidade e, conseqüentemente, comprometer toda a análise realizada. O Apêndice A traz algumas definições do termo falha (*failure*, em inglês) de diversos autores acadêmicos, de organizações internacionais e profissionais.

As definições do termo *failure* presentes no Apêndice A quase sempre estão associadas à expressão “função requerida (ou pretendida)”. No entanto, segundo Nieuwhof (1984), o problema desses conceitos é que não deixam claro o que se entende por “função requerida”. Para esse autor, a definição de falha ganha um sentido mais amplo ao introduzir o conceito de “falha de missão”. Assim, Nieuwhof (1984) propõe distinguir duas noções de falha:

- Falha de equipamento – incapacidade de um item em desempenhar sua função requerida;
- Falha de missão – incapacidade de manter as condições operacionais especificadas (ambiente) para as quais o equipamento foi projetado.

Existem outros elementos envolvidos no ambiente da falha que também não apresentam um consenso das terminologias, principalmente na língua inglesa, em que se encontra o uso dos termos *failure* e *fault* como sinônimos. Valis e Bartlett (2010), e Rausand e Oien (1996) assumem a caracterização dada pela IEC 60050-191 (1990), que indica que a *failure* de um item é um evento, sendo ele distinto do termo *fault*, que representa um estado de um item após a *failure*. Ou seja, uma *failure* (evento) resulta em uma *fault* (estado). A relação entre *failure* e *fault* está esquematizada na Figura 1.

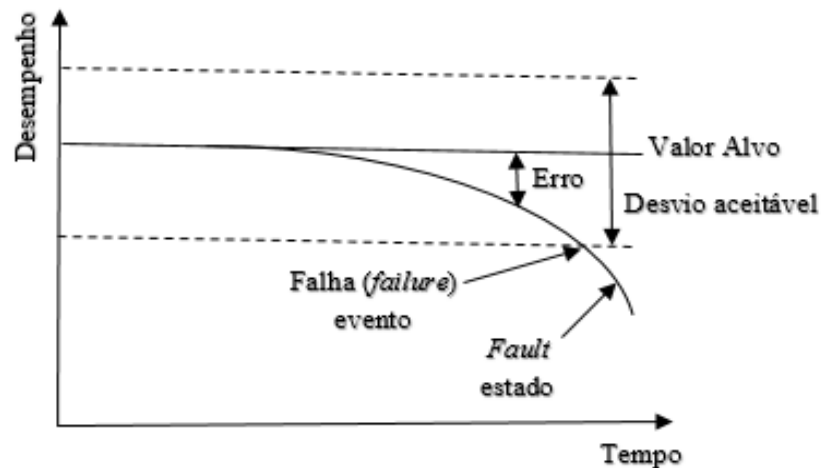


Figura 1 – Ilustração da diferença entre *failure*, *fault* e *error*.

Fonte: adaptado de Rausand e Oien (1996).

A NBR 5462 (ABNT, 1994) também classifica a falha como um evento. Após a falha, o item teria uma pane (estado). No entanto, Sartori et al. (2012) apresentam outros termos mais comuns relacionados ao tema de detecção, diagnóstico e correção de falhas. Nesse trabalho, os autores classificam o termo *fault* como uma condição do sistema que pode, ou não, levar a uma efetiva falha. Essa incompatibilidade técnica (de uma *fault* preceder, ou não, uma *failure*) ainda não está resolvida no meio acadêmico, assim como também não existe um consenso de suas respectivas definições.

Na vida prática para os mantenedores, essas definições são altamente relevantes. Eventos que ocorrem no equipamento nem sempre leva a uma parada imediata, isto é, à falha total. Veras (2016) esclarece que a progressão do estado operacional para o estado de falha pode ocorrer através de processos de degradação do sistema. Segundo Veras, esse processo de degradação é essencialmente gradual e emite sinais de que há uma diminuição do desempenho funcional do sistema até a falha afete por completo sua função. A Figura 2 exemplifica um processo de falha de um sistema mecânico onde é possível observar alguns efeitos que são emitidos antes da falha total, tais como: vibração, ruído, temperatura e entre outros. Tais efeitos podem ser utilizados como balizadores na tomada de decisão operacional e da manutenção.

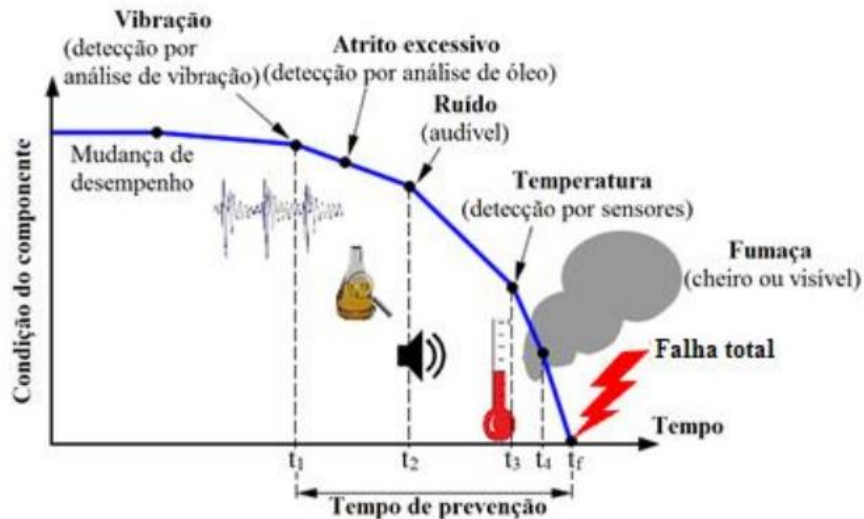


Figura 2 – Exemplo de degradação de um sistema.

Fonte: Veras (2016).

2.1.1 Causas de Falhas

Identificar as causas da falha é o principal objetivo de qualquer processo de investigação para evitar que o evento se repita no futuro. Algumas causas são visíveis e amplamente conhecidas – as chamadas causas primárias, enquanto outras se encontram em regiões latentes e estão relacionadas a questões humano-organizacionais.

A tentativa de estabelecer uma barreira de proteção tomando como base uma causa primária pode ter efeitos catastróficos em sistemas de alto risco e causar grandes prejuízos operacionais por não identificar a verdadeira causa (raiz) do problema. Esse tipo de solução de problema é conhecido como prática de “apagar incêndio”, pois se combate o efeito e não a causa real. Portanto, a identificação da causa primária não permite estabelecer ações que impeçam a recorrência dos eventos.

Geralmente, sua análise gera medidas corretivas que visam apenas minimizar seus impactos ou diminuir a incidência dos eventos. Por outro lado, quando esforços adicionais são destinados a encontrar a causa raiz, as ações tomadas podem evitar que eventos semelhantes se repitam e/ou minimizar ao máximo possível seus efeitos.

Um dos problemas de se chegar às causas mais básicas é a necessidade de empenhar mais esforços, pois em se tratando de sistemas complexos a falha se manifesta de forma sistêmica (ÁVILA FILHO; MENEZES, 2017) e são em sua maioria interdisciplinar (HEUT, 2000). Por exemplo, as falhas podem ter origens nos equipamentos, processo, ambiente externo, decisões operacionais e gerencias, condições de segurança e clima organizacional.

Existem diversas formas de classificar as causas que podem levar a uma falha no sistema, Dennies (2005) introduz o seguinte tipo de classificação:

- Serviço ou operação (uso e mau uso);
- Manutenção inadequada (intencional e não intencional);
- Testes inadequados;
- Erros de montagem;
- Erros de fabricação;
- Erros de projeto.

No entanto, essa classificação proposta por Dennies não deixa claro o papel do indivíduo e da organização. Há mais de 20 anos, o *American Institute of Chemical Engineers* (AIChE, 1994) afirmava que, mesmo após anos de melhorias em segurança de processo, muitas organizações descobriram que as taxas de acidentes, perdas de processo e rentabilidade atingiram um patamar no qual estabelecer novas melhorias parecia impossível. Por outro lado, o que se observa é que até essas organizações, que implantaram sistemas de segurança altamente confiáveis, ocasionalmente estão envolvidas em algum evento grave (sinistro). Por essa perspectiva, a ideia de se estudar os fatores que interferem nas ações humanas ganha uma maior visibilidade.

O indivíduo está sujeito a cometer erros e, em qualquer tarefa, não importa quão simples seja, erros podem acontecer (WHITTINGHAM, 2004; PALLEROSI, 2011). A frequência com a qual esses erros ocorrem dependerá da natureza da tarefa, dos sistemas associados à tarefa e da influência do ambiente no qual a tarefa é realizada. Bao et al. (2014) afirmam que as estimativas gerais da contribuição do erro humano aumentaram ao longo dos anos, passando de um valor baixo de 20 % para valores superiores a 80 % (Figura 3). Nesse sentido, pode-se deduzir que os modelos atuais de prevenção de eventos indesejados ainda não são efetivos quando se tratam de fatores não técnicos.

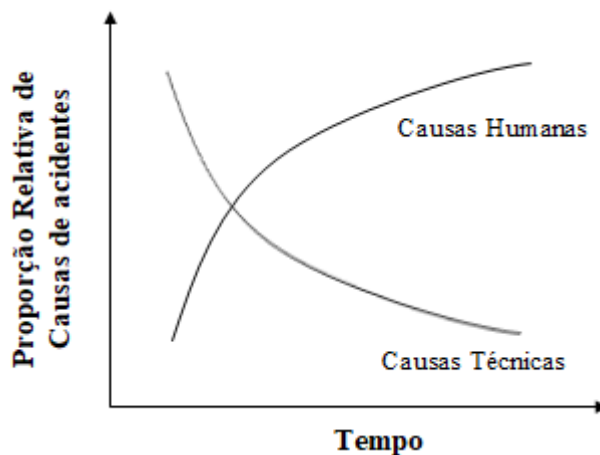


Figura 3 – Tendência da participação de causas humanas e técnicas em falhas de sistemas.

Fonte: adaptado de Bao et al. (2014).

Outro estudo mostra que, independentemente do domínio tecnológico, 60 a 90 % das falhas que ocorrem em um sistema podem ser atribuídas a ações humanas (FORESTER et al., 2009). Um estudo em diferentes setores, o fator humano foi considerado como o principal elemento causador de acidentes. Nesse estudo, os fatores humanos foram responsáveis por 70-80 % dos acidentes na indústria de aviação, 60 % nas indústrias de petróleo e 90 % nas indústrias de metalurgia (XUECAI; DEYONG, 2018). Por outro lado, há quem afirme que todas as falhas físicas são desencadeadas por humanos, mas que são negativamente influenciadas por forças latentes, isto é, fatores organizacionais (NELMS, 1997).

2.2 FATORES LATENTES DA FALHA

Segundo Cacciabue (2000), nos últimos anos houve um aumento considerável da contribuição humana em grandes eventos, alcançando níveis de porcentagens tão altos quanto 70 a 80 %, independentemente do tipo de atividade desempenhada pela organização. Duas principais razões explicam esse aumento: (1) a elevada confiabilidade e refinamento dos componentes mecânicos e eletrônicos e (2) a complexidade do sistema e o papel atribuído ao operador humano nas atividades de controle.

A alta confiabilidade das instalações modernas contribuiu para reduzir a incidência de falhas mecânicas e permitiu um melhor gerenciamento dos processos críticos da planta, mesmo com falhas no sistema. Uma vez que as falhas mecânicas são mais “visíveis”, as ações antecipadas para evitá-las ou anular seus efeitos são tomadas com maior eficiência, o que impacta diretamente na contribuição estatística do erro humano em grandes eventos.

Já no caso da complexidade do sistema, Cacciabue (2004) e outros (CHENG; HWANG, 2015; LEES, 2015; HETHERINGTON; FLIN; MEARNNS, 2006; JOHNSON, 1996; RASMUSSEN, 1983) relatam a dicotomia que envolve a operação do sistema (homem *versus* automação). O uso excessivo da automação transformou o ambiente de trabalho da operação, que agora apresenta as seguintes características:

- i. As atividades passaram a ser mais exigentes em termos de habilidades de raciocínio cognitivo (tarefas mentais) do que de habilidades sensorio-motoras (tarefas físicas) – o homem não é mais o protagonista nas operações em sistemas modernos, realizando atualmente muito mais o trabalho de supervisão e de tomada de decisão;
- ii. O comportamento e as respostas do sistema seguem requisitos estabelecidos pelos projetistas, que nem sempre são totalmente conhecidos ou familiarizados pelos operadores;
- iii. Em condições anormais, o processo de tomada de decisão torna-se mais complexo devido à dinâmica apresentada pela sequência dos eventos. Assim, os processos altamente automatizados, por um lado, permitem reduzir o número de erros humanos em níveis comportamentais e, por outro, aumentam o impacto das consequências quando um erro de raciocínio ou de cognição consegue infringir os sistemas de proteção projetados, tornando os eventos mais difíceis de serem controlados e contidos.

Venkatasubramanian et al. (2003) afirmam que uma das tarefas mais importantes na gestão de planta de processo, a de responder a eventos anormais, ainda é realizada em grande parte de forma manual por operadores humanos. Nesse tipo de tarefa, os operadores humanos tendem a tomar decisões incorretas que muitas vezes pioram ainda mais a situação. Alguns fatores que dificultam essa atividade são: o tamanho e a complexidade das plantas modernas; a sobrecarga de informação – número muito grande de variáveis de processo; e as medições do processo, muitas vezes insuficientes, incompletas e/ou não confiáveis.

Por outro lado, Johnson (1996) chama a atenção para o fato de que o homem ainda desempenha determinadas tarefas melhor do que as máquinas, como, por exemplo, o reconhecimento de padrões, a maioria das tarefas sensoriais e o raciocínio no ambiente de incerteza. Vidal e Carvalho (2008, p. 104), utilizando a visão da ergonomia cognitiva, acrescentam que:

[...] O ser humano possui uma capacidade cognitiva que lhe permite julgar aspectos qualitativos [...], uma capacidade de racionar rapidamente em função dos casos mais prováveis. Assim, afastar o ser humano do controle direto da produção e reduzir sua capacidade de intervenção seria prejudicial, principalmente em situações de perturbação do sistema, uma vez que o ser humano desenvolve atividades adaptativas para fazer frente às situações imprevistas.

As diferentes filosofias existentes conduzem para o questionamento sobre qual seria o grau de participação humana em sistemas de controle de planta, tendo em vista que quanto maiores são os riscos da atividade, mais fortes são os argumentos para a instrumentação e automação do processo. Porém, deve-se levar em conta que o operador ainda tem a função vital de evitar condições de parada inesperada da planta (LEES; 2015).

Essa discussão leva à análise das condições e fatores que contribuem para o erro humano.

2.2.1 Complexidade em Sistema Sociotécnico

O termo complexidade vem ganhando familiaridade nos últimos anos e, assim como qualquer outro termo que está envolvido em diversos domínios da ciência, carece de uma definição formal. Um dos pioneiros na utilização desse termo, no ambiente de discussão de falhas e acidentes em sistemas de tecnologia de alto risco, foi o sociólogo Charles Perrow, em seu famoso livro *Normal Accidents* (PERROW, 1984). Nessa obra, Perrow não fornece uma definição formal de complexidade, mas estabelece os seguintes elementos que caracterizam os sistemas complexos:

- Proximidade de partes ou unidades que não estão em uma sequência de produção;
- Muitas conexões entre componentes (partes, unidades ou subsistemas) que não estão em uma sequência de produção;
- *Loops de feedback* não familiarizados ou não intencionais;
- Muitos parâmetros de controle com potenciais interações;
- Fontes de informação indiretas ou inferenciais;
- Conhecimento limitado de alguns processos.

Apesar de a caracterização de sistemas em complexo, ou linear (seu oposto), ser amplamente utilizada, Perrow (1984) chama a atenção para o fato de que, na verdade, são as interações presentes e predominantes nesses sistemas que devem receber essa classificação. Assim, os sistemas devem ser caracterizados em termos do grau de ambas as qualidades de

interação (complexa e linear). Interações lineares predominam em todos os sistemas e mesmo os sistemas mais lineares podem ocasionalmente ter interações complexas.

Outra observação realizada por Perrow mostra que não se deve equiparar a noção de sistema linear ao *layout* físico da planta ou ao processo de produção. Nesse sentido, um sistema caracterizado como linear não implica necessariamente em uma linha de montagem, embora esses sistemas de produção tendam a ser lineares.

A designação de “sistema complexo” também não implica necessariamente em um sistema com tecnologia altamente sofisticada, numerosos componentes ou muitos estágios de produção. A classificação proposta por Perrow considera as relações entre as partes técnicas do sistema e o ambiente, mas não as complexidades relativas ao operador, que incrementam o grau de complexidade do sistema como um todo. Ávila Filho (2012) afirma que a discussão de complexidade pode ser relacionada a três ambientes: processo, tarefa e relações sociais.

A primeira classificação proposta por Ávila Filho, a de processo complexo, remete à discussão proposta por Perrow em sistema técnico. Já a complexidade da tarefa leva em consideração os seguintes elementos: (i) os requisitos externos para a realização da tarefa são muitos e dependem de processamento final para a tomada de decisão; (ii) existem etapas paralelas no procedimento (realizadas por dois ou por um operador) que podem ter riscos elevados; (iii) a influência de fatores causadores de tensão física e/ou psicológica na realização da tarefa; (iv) o nível de automação e projetos de equipamentos exige atenção em sistemas múltiplos (principal e auxiliar) e (v) o uso de procedimentos alternativos, não escritos, na operação.

No caso do ambiente social, a complexidade é responsável por influenciar as omissões no ato da realização da tarefa e/ou na escrita dos relatórios. Os elementos que compõem esse ambiente são: (i) incorporação de objetivos organizacionais nos procedimentos; (ii) mapa mental no planejamento da tarefa; (iii) relação social e técnica durante a execução da tarefa; e (iv) a análise de valores e recompensas entre tarefa realizada e benefício alcançado.

As diferentes formas de manifestação da complexidade (processo, tarefa e aspectos sociais) sugeridas por Ávila Filho (2012) indicam que até mesmo sistemas lineares podem apresentar certos graus de complexidade – o que corrobora a afirmação de Perrow (1984). Por outro lado, uma vez que sistemas altamente sofisticados têm a possibilidade de apresentar um ou mais níveis de interações complexas, dificilmente esses sistemas não incorrerão em algum tipo de complexidade.

A necessidade de se discutir complexidade nas organizações ganha notoriedade na afirmação de Perrow (1984), segundo a qual existem características em sistemas de tecnologia de alto risco que sugerem haver uma forma de acidente inevitável, considerado como “normal”, não importando o quão eficaz seja o dispositivo de segurança. Kohn, Corrigan e Donaldson (2000) completam essa afirmação com o pensamento de que as interações complexas e o forte acoplamento entre as partes de um sistema contribuem para que pequenas falhas possam se transformar em grandes acidentes.

2.2.2 O Erro Humano

Alguns autores que discutem o erro humano são Meister (1966), Swain e Guttman (1983), Rasmussen (1983), Norman (1988), Hollnagel (2010), e Reason (2016). Cada autor tem uma visão de como esse erro se manifesta. Whittingham (2004) reuniu contribuições de alguns desses autores para propor uma definição final sobre o erro humano, na qual ele é visto como “uma falha não intencional de uma ação intencional, isoladamente ou como parte de uma sequência planejada de ações, para alcançar um resultado desejado dentro de limites estabelecidos de tolerância, pertencentes à ação ou ao resultado”. Whittingham ainda cita quatro elementos para a caracterização do erro humano: (1) a intenção de alcançar um resultado desejado; (2) a definição da ocorrência ou não do erro; (3) a significância de um erro e (4) a intenção.

A primeira característica, a intenção de alcançar um resultado desejado, elimina a questão das ações espontâneas e involuntárias da categoria de erro humano. Uma maneira comumente usada para descobrir se um erro ocorreu é a comparação entre o resultado (real) alcançado e o pretendido. No entanto, segundo Whittingham (2004), tal definição não é adequada, pois nos casos de um erro ocorrer e, na sequência, uma ação de recuperação conseguir anular os efeitos da ação anterior, seria incorreto dizer que não houve erro humano. Até porque é possível que em outra oportunidade a ação de recuperação não resultasse no efeito esperado ou fosse tardiamente realizada e, portanto, o resultado final seria diferente.

A significância do erro humano diz respeito ao fato de que a gravidade do erro e, conseqüentemente, o interesse sobre ele, depende inteiramente de suas conseqüências. Assim, se uma ação humana não resultar em conseqüência alguma, não necessitando também de uma ação recuperadora, tal ação não é vista como um erro humano. O último aspecto, a intenção, é extremamente importante, porque impõe uma distinção entre erro e violação.

2.3 VISÃO SISTÊMICA DA FALHA

Desde que os resultados das investigações de acidentes coincidiram em apontar o indivíduo como elemento-chave no processo de desenvolvimento da falha, intensificaram-se os esforços para descobrir quais fatores influenciam nesse processo, como eles interagem entre si e como eles são estabelecidos no ambiente de trabalho. No entanto, é importante ressaltar que dificilmente a ação humana é vista como a única causa das falhas (REN et al., 2008; VIDAL; CARVALHO, 2008; SHAPPELL; WIEGMANN, 1997) e que a influência da organização nos Fatores de Desempenho Humano (PSFs, do inglês *Performance Shaping Factors*) desperta cada vez mais interesse da comunidade acadêmica (WEI; ERPING, 2010; FORESTER et al., 2009; NELMS, 1997; MESHKATI, 1991).

Devido às características intrínsecas ao ser humano, os operadores tendem a cometer erros, mesmo em uma condição ideal de trabalho (AHMAD; PONTIGGIA; DEMICHELA, 2014). Portanto é impensável esperar um desempenho humano livre de erros (SHAPPELL; WIEGMANN, 1997). Segundo Bridges e Tew (2010), todos os acidentes são resultados de erros humanos. Como justificativa dessa declaração, esses autores afirmam que o ser humano pode influenciar outros no ambiente de trabalho ao criar deficiências no projeto, ao dar ordens, em responsabilidades, na escrita de procedimentos, nos *feedbacks* etc.

Essa abordagem proposta por Bridges e Tew generaliza o erro humano ao englobar aspectos humano-organizacionais em um só. É sabido que, ao se tratarem de fatores organizacionais, também se refere ao ser humano, pois toda organização é feita e comandada pelo homem – essa abordagem sugere que toda falha tem como causa o homem. As atividades que nas quais os erros têm maior influência incluem:

- Concepção do processo;
- Engenharia de processo;
- Especificação de componentes de um processo;
- Recepção e instalação de equipamentos;
- Comissionamento;
- Operação;
- Estabelecimento de salvaguardas;
- Manutenção, inspeção e reparo;
- Solução de problemas;
- Gestão de mudanças.

Para realizar a classificação dos elementos envolvidos na falha em técnico, humano e organizacional é necessário primeiro conhecer a estrutura organizacional como forma de distribuir equilibradamente a responsabilização pelo evento e garantir que medidas mais eficazes sejam tomadas. Além disso, é importante discutir a ideia de que a falha é de origem exclusiva da ação ou da omissão do indivíduo (operador). Uma estrutura organizacional assumida para apresentar essa discussão é mostrada na Figura 4.

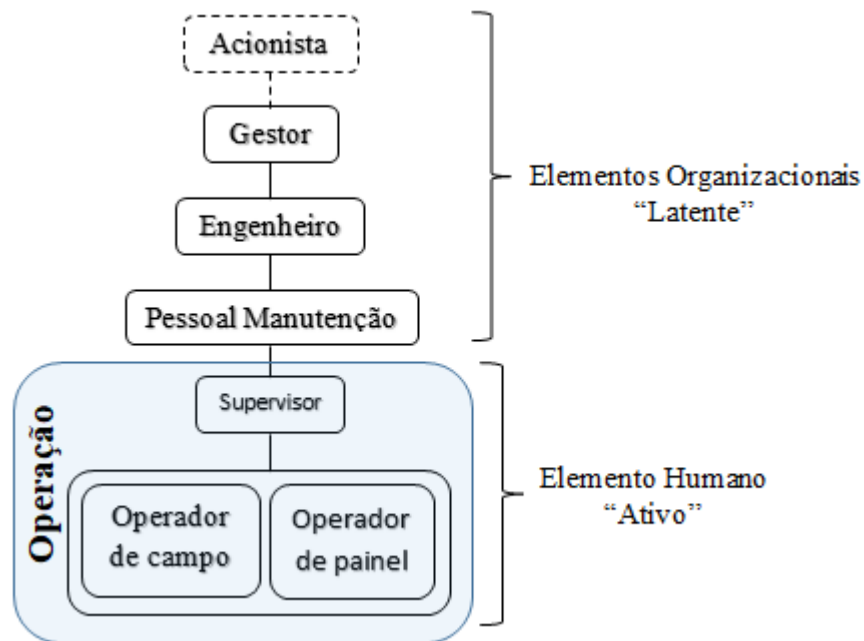


Figura 4 – Estrutura organizacional proposta.

Fonte: adaptado de Ahmad; Pontiggia e Demichela (2014).

O erro humano é constantemente associado a “alguém (operador) que cometeu um erro”, sendo este o responsável pela falha. Porém, a realidade é muito mais complexa. Não se pode falar do erro humano sem o seu contexto. Para profissionais da área da ergonomia cognitiva, é impensável atribuir o erro humano (operador) como a causa raiz das falhas, mesmo admitindo que pessoas possam cometer vários equívocos (VIDAL; CARVALHO, 2008).

Hollnagel (2016) acrescenta que a “visão antiga” de erro humano responsabiliza os indivíduos (operadores) por estarem presentes no momento errado e no lugar errado. Uma das justificativas para isso é a crença de que as pessoas têm a liberdade de escolher suas ações, portanto, elas são responsáveis por escolher os errados. Na “nova visão”, o erro humano tende a ser visto como um sintoma ou consequência de um problema mais profundo do sistema ou local de trabalho – visão sistêmica. Nesse sentido, Boring (2012) afirma que geralmente em

análises de confiabilidade humana o erro humano não é visto como um resultado de falhas individuais, mas é resultante de uma combinação de fatores contextuais e situacionais que influenciam o desempenho humano.

A tipificação do erro humano é tratada por diferentes áreas (segurança, ergonomia cognitiva, engenharia de fatores humanos), resultando em diferentes modelos que tratam de descrevê-la. Atualmente existe uma tendência para aceitação da visão sistêmica que considera a falha de sistema complexo com origens de múltiplos fatores. A ideia é de que esses fatores ocorrem juntos em uma interação inesperada, criando uma cadeia de eventos em que as falhas crescem e evoluem, levando a um estado indesejado (KOHN; CORRIGAN; DONALDSON, 2000). Nessa cadeia de acontecimentos, o erro humano é um evento intermediário que ocorre antes do evento topo e está relacionado a aspectos ambientais, políticos, econômicos, sociais e culturais (ÁVILA FILHO et al., 2013a).

A percepção da complexidade dos eventos influenciou na evolução do pensamento sobre causalidade de acidentes. Os primeiros modelos partiram de uma visão “simplista-linear” que interpreta o evento topo como resultado de uma série de eventos em uma ordem específica e reconhecível, sendo os acidentes prevenidos por meio da eliminação de uma das causas da sequência linear. Modelos posteriores incorporaram a ideia da complexidade do sistema, mas ainda consideravam um caminho linear. A nova geração se move na direção de reconhecer que os modelos são não lineares. Nesse caso, presume-se que os acidentes resultam de combinações inesperadas de múltiplos fatores que interagem entre si (PRYOR; TEPE, 2012). A evolução temporal das três fases distintas (linear-simples, linear-complexo e não linear-complexo) é mostrada na Figura 5.

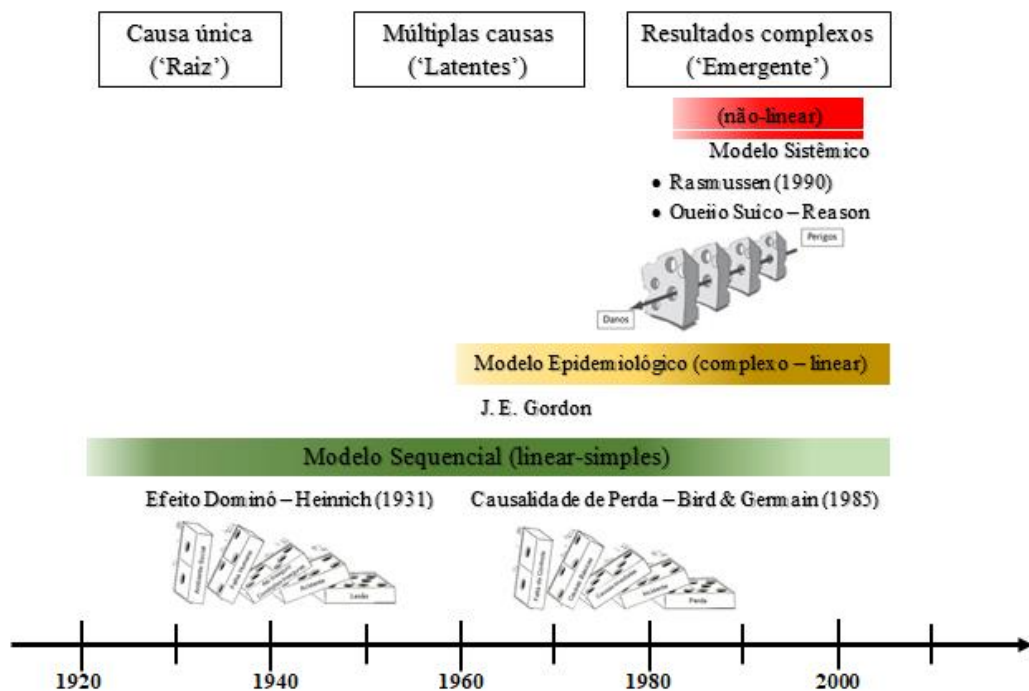


Figura 5 – Evolução dos modelos de causalidade de acidente.

Fonte: adaptado de Pryor e Tepe (2012).

Após 50 anos, o modelo de Heinrich foi atualizado por Bird e Germain (1985) que mantiveram a linearidade dos cinco dominós, mas acrescentaram o fator gerencial para prevenir e controlar os acidentes que se tornavam cada vez mais complexos com os avanços tecnológicos (PRYOR; TEPE, 2012). Conforme o pensamento sistêmico avançava, isto é, o reconhecimento da complexidade e da causalidade de acidentes, outros modelos foram desenvolvidos. A partir de então, estudos assinalaram que muitos fatores que contribuem para o erro humano estão dentro do controle organizacional (gerencial).

Em geral, especialistas em diferentes domínios podem usar diferentes categorias para classificar erros humanos e organizacionais. Um dos trabalhos de destaque nessa área foi realizado por James Reason, um psicólogo especialista em fatores humanos que passou a abordar essa questão classificando dois tipos de erro: o ativo e o latente.

Erros ativos são aqueles em que “seus efeitos são percebidos quase instantaneamente” e erros latentes “são consequências adversas que tendem a permanecer adormecidas por um longo período, tornando-se evidentes apenas quando são combinadas com outros fatores para romper as defesas do sistema” (REASON, 1990, p. 173). Reason associou os erros ativos aos “operadores de frente de linha”, isto é, aqueles que têm ligação direta com a interface do sistema, como os operadores.

Erros latentes, por outro lado, são gerados por aqueles que não têm uma relação direta com as atividades de controle. Fazem parte desse grupo os projetistas, o pessoal de manutenção e os tomadores de decisão de alto nível (engenheiros, coordenadores, gerentes). Em trabalhos posteriores, erros ativos passaram a ser denominados de falhas ativas e os erros latentes, por sua vez, de falhas latentes e posteriormente de condições latentes.

Reason ainda destaca que, no passado, as investigações de acidente e análises de confiabilidade eram focadas nos erros ativos de operadores. Ele reconhece que, de fato, operadores podem cometer erros, e frequentemente o fazem, porém, outros fatores (ou condições) já estavam presentes no sistema, em um estado de incubação, antes mesmo do erro ativo ter acontecido.

Condições latentes podem ficar “adormecidas” ou indetectáveis por horas, dias, semanas ou até mais, até que um dia a falha seja evidente (SHAPPELL; WIEGMANN, 2010). Em outros casos, algumas condições estabelecidas no sistema (projeto inadequado de equipamentos, por exemplo) são amplamente conhecidas, mas, por questões diversas, deficiências como essa acabam sendo aceitas pela operação/manutenção e são assimiladas na rotina com ajustes constantes. O modelo proposto por Reason (Figura 6) é comumente conhecido como o “Modelo do Queijo Suíço” (*Swiss Cheese Model* – SCM) e, como o próprio nome sugere, faz uma alusão das aberturas típicas desse queijo com as deficiências dentro de uma organização que ocasionam as perdas.

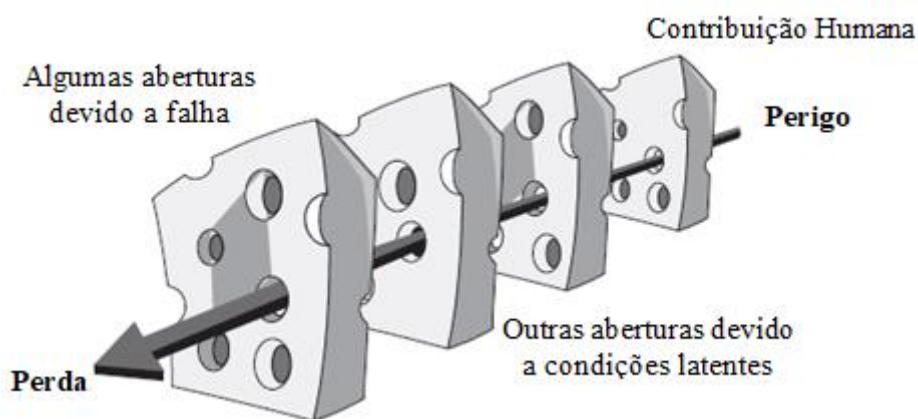


Figura 6 – Versão mais recente do modelo do “Queijo Suíço” de Reason.

Fonte: Reason (2016).

O SCM presente na Figura 6 representa a versão mais recente do modelo que foi originalmente proposto em 1990. Nesse modelo, Reason estabelece pelo menos três características comuns nos acidentes organizacionais: perigos, defesas e perdas. A forma mais

comum de prevenir as perdas é por meio da implantação de barreiras em vários níveis do sistema. No entanto, é importante ressaltar que nesse modelo não basta apenas existir as deficiências para resultar em algum evento, é necessário que as deficiências estejam alinhadas para que o evento possa resultar em alguma perda. De fato, felizmente, nem todos os eventos que ocorrem no meio industrial ocasionam perdas, sendo antes interrompido pelos sistemas de segurança e proteção.

Essas barreiras podem alcançar um elevado nível de proteção, podendo ser à prova de falhas humanas ou de técnicas simples. Porém, como pontuado por Reason, nenhuma barreira é perfeita. O evento indesejado acontecerá quando as lacunas ou fraquezas se alinharem para permitir uma trajetória que ocasione o evento (REASON, 2016). As lacunas ou deficiências nas barreiras se devem a dois motivos: falhas ativas e condições inseguras.

As condições latentes, na versão mais recente do SCM, não são consideradas necessariamente como causas, mas algo cuja presença é uma condição necessária para uma causa ter um efeito (REASON, 2016) – muitas vezes são chamadas de patógenos residentes. São os projetistas, os mantenedores, o pessoal da montagem e os gerentes que semeiam inadvertidamente tais condições no sistema. No entanto, independente de quão bom seja o sistema de proteção, essas condições irão surgir pelo simples fato de ser impossível prever todos os possíveis cenários de eventos, ainda mais que muitos deles têm influência do comportamento individual dos operadores, que é algo difícil de “auditar”.

Haver condições latentes no sistema não significa que uma falha acontecerá de imediato. As condições latentes ficam em estado de incubação até que um caminho viável se conecte às falhas ativas e ocasione a falha. Nesse sentido, Reason estabeleceu dois caminhos causais: um caminho de falha ativa, que parte da organização por meio das condições de trabalho para as ações do pessoal da linha de frente (ou “*sharp-enders*”); e um caminho da falha latente, que vai diretamente dos processos organizacionais para as defesas. Nota-se que os dois caminhos têm suas origens no processo organizacional. A Figura 7 mostra a anatomia do acidente organizacional.

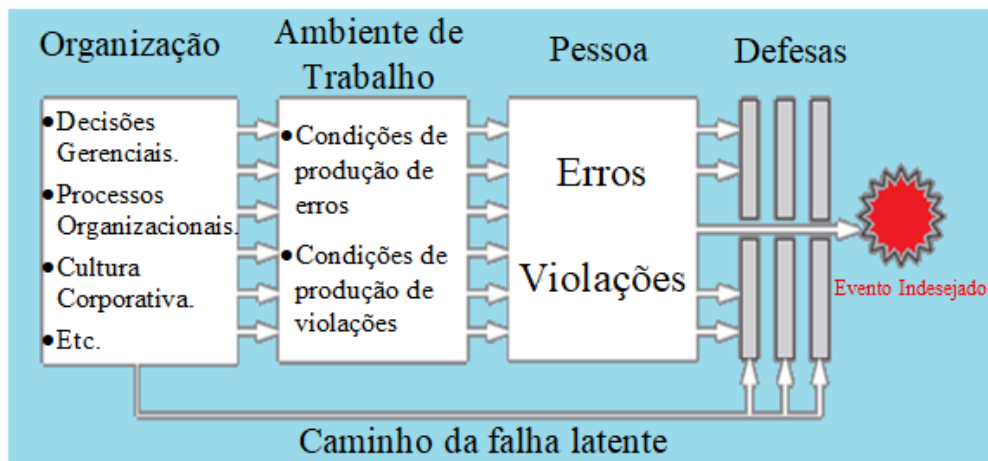


Figura 7 – Resumo dos estágios envolvidos no acidente organizacional.

Fonte: adaptado Reason (2016, p. 10).

A sequência do evento começa com consequências negativas de aspectos organizacionais – decisões gerenciais relacionadas ao planejamento, concepção e projeto de instalações, comunicação, monitoramento, auditoria, cultura de segurança e outros. Uma vez presentes no sistema, essas condições são transmitidas para os vários locais de trabalho, onde promovem erros e violações (altas cargas de trabalho, pressão de tempo, etc.).

Li e Thimbleby (2014) afirmam que o esquema original apresentado por Reason não esclarece a diferença entre os tipos de falhas de defesa – se os vazios são devidos a erros intencionais, lapsos, enganos, ou violações deliberadas. Esses autores ainda acrescentam que o SCM não fornece indicações de como as múltiplas defesas devem ser organizadas para tornar o sistema mais resiliente contra erros de quaisquer naturezas.

Por outro lado, French et al. (2011), ciente das limitações do SCM, argumentam que muitos leitores têm uma interpretação muito mecanicista do modelo – número fixo de fatias e barreiras, bem como a falta de dinâmica (idealização de vazios ou buracos fixos). Já na visão de Young e Coleman (2009, p. 114), “a concentração rígida na identificação de condições latentes pode ofuscar a importância dos erros ativos, que podem ser fatores dominantes e não apenas sintomas de deficiências inerentes ao sistema”.

O SCM cita apenas alguns elementos que podem influenciar no processo de falha. Atualmente, sabe-se que existem múltiplos fatores que influenciam o indivíduo no desempenho de suas atividades. A Norma API 770 reúne mais de 50 elementos conhecidos como Fatores de Desempenho Humano (*Performance Shaping Factor* – PSF), que podem ser divididos em três classes: (1) PSFs internos, que agem dentro dos indivíduos, (2) PSFs externos, que agem no indivíduo e (3) fatores de estresse.

Alguns desses elementos são intrínsecos ao operador (habilidade, estado emocional, identificação com o grupo) podendo estes ser melhorados ou agravados de acordo com a relação do operador com seus pares ou superiores (coordenadores e gerentes). Por exemplo, o treinamento pode ser melhorado com investimentos e incentivos da administração; os problemas familiares afetam o estado emocional e podem sofrer influência positiva ou negativa do estilo gerencial da empresa – promoção de políticas de orientação ou um estilo de liderança que não se importa com questões que não são do interesse da organização. É nesse sentido que Lorenzo (2001, p. 10) afirma que “os gerentes devem reconhecer que a maioria dos PSFs (incluindo muitos PSFs internos) está dentro de seu controle”. Assim, o ambiente organizacional pode criar condições que otimizem o desempenho do trabalhador e minimizem os erros humanos.

Lorenzo (2001) classifica dois tipos básicos de erros que os gerentes devem resolver: (1) erros cujos fatores causais primários sejam devidos às características humanas individuais que não estão relacionadas à situação de trabalho, e (2) erros cujos fatores causais primários estejam relacionados ao projeto da situação de trabalho. Este último é o responsável pela grande maioria do erro humano, entre 80 e 85 %.

Considerando todas as abordagens apresentadas até aqui, nota-se que não existe um consenso sobre as responsabilidades de causalidade de um evento indesejado. Ora se atribuem às características individuais do comportamento humano como elemento principal no processo de falha, ora tratam-se as influências organizacionais como os verdadeiros responsáveis do evento topo. No entanto, o fato é que os sistemas de alta complexidade tendem a apresentar origens diversas de falhas (ÁVILA FILHO; MENEZES, 2017) e dificilmente terão influência de apenas um fator, seja ele humano ou organizacional. A Figura 8 esquematiza o formato complexo da falha, denominado de digital da falha.

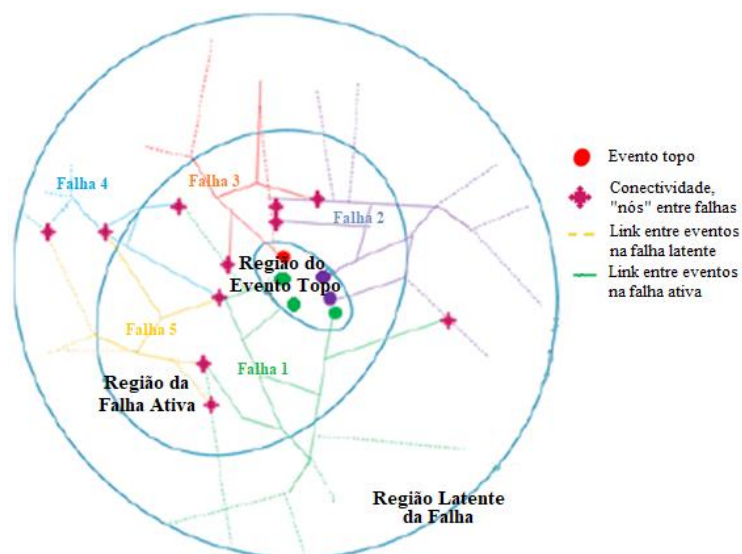


Figura 8 – Digital das Falhas.

Fonte: Ávila Filho e Menezes (2017).

O modelo proposto na Figura 8 traz um formato sistêmico da falha, onde o evento topo é resultante da interação de várias falhas. Segundo Ávila Filho e Menezes (2017), esse formato se contrapõe à visão simplificada de que o evento topo tem sua origem em um nexos causal sequencial em formato de árvore de falha. A falha pode se manifestar em diversas dimensões (materiais, cognição, tecnologia, gerenciamento), que inclusive podem apresentar eventos comuns e, muitas vezes, os mesmos desvios iniciais e ambientais de influência.

É preciso ainda destacar duas características importantes nesse modelo: (1) as falhas que levam ao evento topo têm suas origens em regiões latentes, e (2) os eventos apresentam uma comunicação entre si. Um exemplo genérico de como esse processo funciona está apresentado na Figura 9.

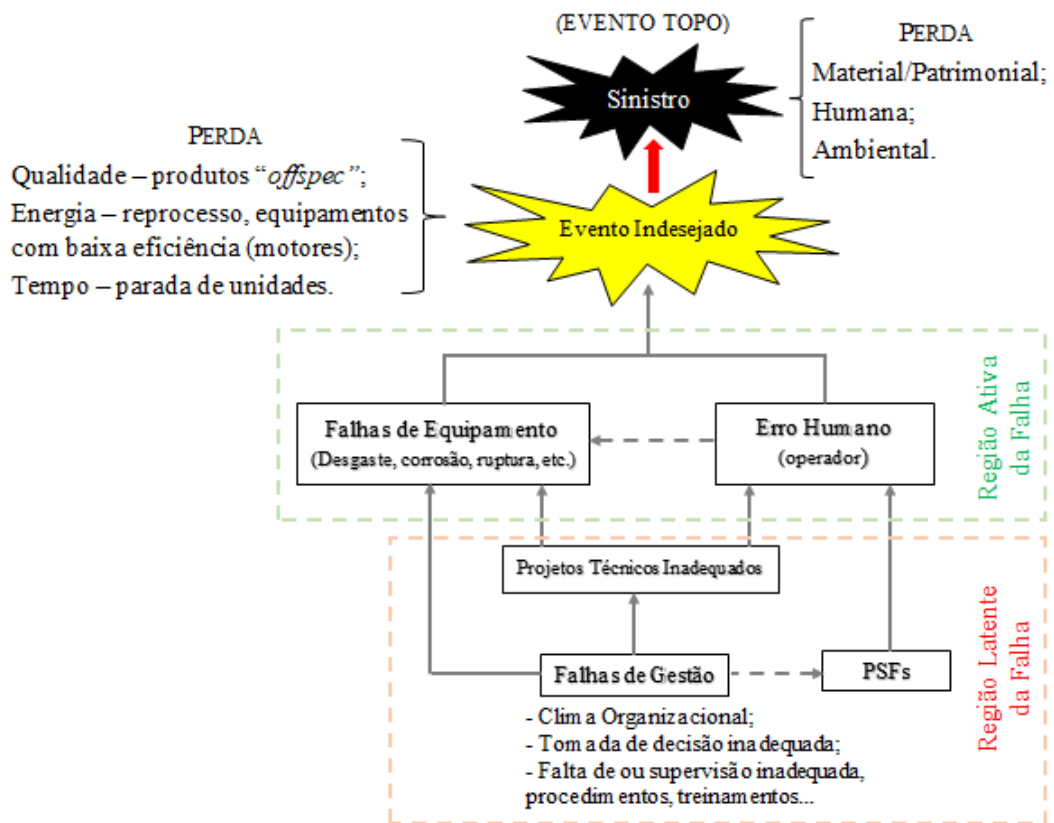


Figura 9 – Exemplificação da relação entre fatores que originam um evento indesejado.

Fonte: adaptado de Kariuki e Lowe (2006).

A Figura 9 traz um exemplo que caracteriza a relação entre as regiões latente e ativa da falha. Nessa exemplificação, o evento indesejado pode ter influência de diretrizes inadequadas de executivos, gerando um ambiente indutor ao erro humano que, quando somado às questões intrínsecas do operador (estresse, falta de atenção, de conhecimento, ou de experiência etc.), pode afetar o equipamento e causar efeitos adversos no processo.

Quando equipamentos falham, as consequências dependerão da natureza da falha e da complexidade do equipamento. Por exemplo, equipamentos rotativos de processo, que tendem a apresentar grandes dimensões, geralmente têm impacto direto na perda de produção resultante de sua indisponibilidade. Porém, quando as falhas alcançam níveis catastróficos, coisas ruins podem acontecer como danos severos ao ativo, paralisação de uma unidade ou uma planta inteira, lesão e morte de pessoas, danos ao meio ambiente (liberação de poluentes), entre outras. Outra questão a se considerar é que os mais variados tipos de equipamentos apresentam uma grande diversidade em sua construção e aplicação, essa característica pode ser assustadora para um novo operador e um desafio para o veterano (LEBLEU; PEREZ, 2014).

A discussão dos fatores que têm o potencial de influenciar as tarefas, o desempenho e integridade do equipamento, e até mesmo o processo como um todo, apresentadas neste trabalho têm como principais referências os seguintes autores:

- Rasmussen (1983), em seu Modelo SRK (*Skill, Rule, Knowledge*), define três níveis de comportamento ou processos psicológicos presentes no processamento de informações do operador que podem ocasionar em erros;
- Perrow (1984) caracteriza a natureza inevitável da falha em função do nível de complexidade do sistema;
- Reason (2016), em seu Modelo do “Queijo Suíço”, caracteriza o evento falha em duas regiões – ativa e latente. A região ativa é composta por ações humanas nas quais seus efeitos são, na maioria das vezes, instantaneamente percebidos. Por outro lado, a região latente são condições criadas pelas organizações que estão “adormecidas” sendo necessária uma combinação de fatores para ativá-las e dar início ao processo de falha;
- Hollnagel (2010) que defende a necessidade de se ter uma visão sistêmica do processo de falha – análise do contexto operacional. Esse autor ainda esclarece que o erro humano tende a ser visto como um resultado de um problema muito mais complexo. Ou seja, por essa visão, o erro humano tende a ser visto como uma consequência, e não como a causa (raiz) dos problemas.

2.4 FERRAMENTAS DE CONFIABILIDADE PARA ANÁLISE DE FALHA

2.4.1 Confiabilidade Operacional

Um dos temas de maior visibilidade na busca pela melhoria e excelência organizacional tem sido a aplicação da confiabilidade de sistemas, que analisa de forma qualitativa os modos de falhas de determinado equipamento, permitindo fazer previsões sobre as probabilidades de ocorrência de falhas, que por sua vez contribuem para a definição de políticas de manutenção, entre outras abordagens. Esse é um método tradicional de análise que está cada vez mais robusto e focado na utilização de ferramentas matemáticas e estatísticas.

Como forma de apoiar e complementar a análise da confiabilidade humana e, conseqüentemente, de maximizar a visão da falha no seu formato sociotécnico, buscou-se aplicar os conceitos de confiabilidade operacional proposto por Ávila Filho (2013b). Na visão

de Ávila Filho, as tarefas realizadas em instalações de alto risco dependem da sua criticidade quanto aos impactos sobre a economia, a natureza e a imagem da organização. Esse conjunto pode ser avaliado por meio da perspectiva dos seguintes fatores: (i) a frequência de realização da tarefa e a possibilidade de falha; (ii) a severidade ou o impacto da tarefa caso ocorra sua falha e (iii) a complexidade envolvida na produção.

A frequência se refere ao agendamento de realização do procedimento para a manutenção da produção e da estimativa de probabilidade de falha da tarefa que será realizada. A severidade ou o impacto dizem respeito à análise de maior ou menor possibilidade de impacto social, ambiental e econômico, ou seja, à identificação do risco e de seu respectivo tratamento.

Por sua vez, a complexidade é caracterizada por tipo de nó social, nível de automação da tecnologia instalada, tipos de equipamento, a relação existente entre os controles e as linhas de reciclo (produto e energia), as diversas interligações de utilidades e a calibração da atenção demandada pela tarefa no aparelho cognitivo. De acordo com Embrey (2000), a complexidade tem uma forte relação com o procedimento, mais especificamente com o número de etapas que tem o procedimento (potencial de afetar a atenção e o seu cumprimento).

Ávila Filho (2013b) estabeleceu uma série de aspectos que provocam ruído no mapa mental e prejudicam a decisão na tarefa, entre os quais:

1. O seguimento das etapas do procedimento escrito (disciplina operacional) que pode ser afetado pelos vícios, traços regionais ou comportamentos. Esse elemento é analisado segundo a porcentagem de descumprimento da tarefa, por exemplo, 20 % das etapas não são realizadas de acordo com o procedimento escrito;
2. O nível de automação. Os sistemas com níveis elevados de automação proporcionam um menor esforço humano para controlar as ações, porém aumentam a sua complexidade no aspecto cognitivo;
3. A relação entre sistemas auxiliares e sistema principal. A presença de sistemas auxiliares, que demandam operações e controles para a função principal dos equipamentos, pode indicar maior complexidade devido ao aumento de monitoramento das variáveis de controle e da necessidade de compartilhamento da atenção em relação ao sistema principal;

4. Nível de linhas de reciclo da planta em comparação a linhas principais. Se o processo possui fluxo linear com melhor nível de predição ou possui fluxo de processo complexo com reduzida predição de estado.

Além desses quatro elementos sugeridos por Ávila Filho, foi acrescentada à metodologia a avaliação dos aspectos de segurança, meio ambiente e saúde (SMS) do processo, com o objetivo de identificar os riscos aos quais os operadores estão submetidos na realização da tarefa. A identificação desses riscos auxilia a compreensão do nível de estresse nas atividades de operação, bem como verifica se questões relacionadas à ergonomia interferem na rotina operacional. Esses dois aspectos, nível de estresse e questões ergonômicas, são alguns dos fatores de maior peso nas metodologias utilizadas para quantificação da taxa de erro humano.

2.4.2 Confiabilidade Humana – Método SPAR-H

A análise da confiabilidade humana compreende o estudo preditivo de erros humanos, tipicamente aplicável em sistemas críticos de segurança (BORING, 2012). Nesse sentido, o erro humano é qualquer ação ou omissão de um indivíduo que diminua a segurança do sistema. Em termos técnicos, a confiabilidade pode ser definida como “a probabilidade de uma pessoa não falhe no cumprimento de uma tarefa (ação) requerida, quando exigida, em um determinado período de tempo, em condições ambientais apropriadas e recursos disponíveis para fazê-lo” (PALLEROSI; MAZZOLINI; MAZZOLINI, 2011, p. 25).

Pallerosi (2008) afirma que a determinação da confiabilidade humana é uma consequência lógica do estudo da confiabilidade de equipamentos. Reconhecendo que o homem falha, essas falhas podem ser classificadas, quantificadas e matematicamente analisadas através de métodos de previsão que incluem ferramentas como TESEO, HEART, SPAR-H, THERP, ASEP, MPPS, entre outras.

A técnica SPAR-H (*Standardized Plant Analysis Risk Human*) originou-se da simplificação e generalização de duas técnicas mais conhecidas na época de sua concepção, são elas a THERP (*Technique for Human Error Rate Prediction*) e a ASEP (*Accident Sequence Evaluation Program*). ASEP foi originalmente batizada com o acrônimo de ASP HRA (*Accident Sequence Precursor Human Reliability Analysis*), em reconhecimento do seu uso no programa ASP da Comissão do Programa de Regulamentação Nuclear dos Estados Unidos da América em conjunto com o *Idaho National Laboratory*. A partir de 1999, após

processos de atualizações no modelo, o método passou a se chamar SPAR-H (NUREG 6883, 2005). As etapas básicas do método são as seguintes:

- Decomposição das probabilidades em contribuições de falhas de diagnóstico ou falha de ação;
- Avaliação do contexto associado com os eventos de falha humana usando os fatores de desempenho humano (PSFs);
- Uso de valores de probabilidade de erro humano e dos PSF pré-estabelecidos seguindo o guia NUREG-6883;
- Análise de dependência entre as tarefas. Caso a tarefa seja a primeira da sequência, não se realiza a análise de dependência por não existirem atividades anteriores;
- Uso de planilhas desenvolvidas especialmente para assegurar uma análise consistente (planilhas NUREG 6883 – Anexos A e B).

2.4.2.1 Fatores de desempenho humano do Método SPAR-H

Assim como a maioria dos métodos de Análise de Confiabilidade Humana (ACH), o SPAR-H baseia-se na análise de fatores de desempenho humano (PSF). Apesar da grande quantidade de PSFs encontrados na literatura, somente a norma API 770 lista mais de 50 (LORENZO, 2001), esse método avalia apenas oito deles. Os PSFs utilizados nesse método podem ser classificados em três grupos: (i) aspectos ergonômicos, como a qualidade da interface homem/máquina; (ii) aspectos da tarefa, como o tempo disponível, treinamento, processos de trabalho, complexidade, e qualidade dos procedimentos e (iii) aspectos intrínsecos do trabalhador, como estresse, aptidão para o serviço e experiência.

Segundo o NUREG-6883 (2005), ao contrário da maioria dos métodos de ACH, o método SPAR-H reconhece que o número de PSFs pode ter um efeito positivo e negativo no desempenho do indivíduo. Por exemplo, o treinamento pode influenciar o desempenho de forma positiva (quando o treinamento enfatiza as respostas aprendidas apropriadas) e negativamente (quando o treinamento é inadequado ou ausente). A Figura 10 mostra ambas as influências na probabilidade de erro humano.

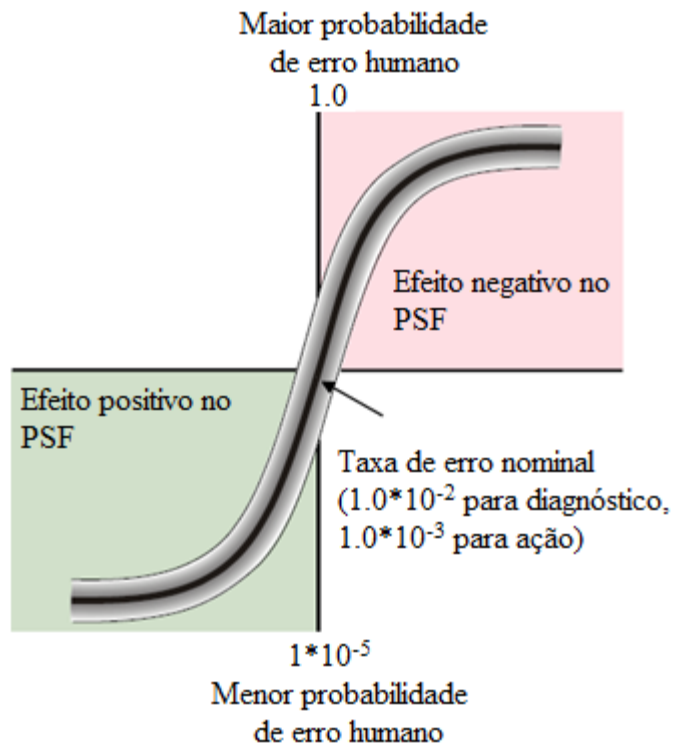


Figura 10 – Probabilidade de erro humano como uma função da influência do PSF.

Fonte: adaptado de NUREG-6883 (2005).

Conforme mostrado na Figura 10, a probabilidade de erro aumenta à medida que a influência negativa do PSF cresce. Por outro lado, as probabilidades de erro diminuem à medida que a influência positiva do PSF cresce até atingir um limite inferior.

a) Tipo de tarefa: diagnóstico e ação

O método SPAR-H distingue as tarefas em orientação para diagnóstico, orientação para ação, e com ambas as características, diagnóstico e ação. Logo após a identificação da tarefa, o analista deve classificá-la. As tarefas com um viés de diagnóstico têm a ver com percepção de eventos anormais, análise de suas causas para reduzir ou eliminar o problema. Portanto, fazem parte desse tipo de tarefa a interpretação e (quando necessária) tomada de decisão. As tarefas de diagnóstico geralmente dependem de conhecimento e experiência para entender as condições existentes, planejar e priorizar as atividades e determinar os cursos de ação apropriados (NUREG-6883, 2005).

No caso das tarefas de ação, a realização de uma ou mais atividades (por exemplo, etapas ou tarefas) são guiadas pelo diagnóstico, pelas regras de operação ou pelos procedimentos escritos. Exemplos de tarefas de ação incluem equipamentos operacionais, partida de bombas, realização de calibração ou teste, realização de ações em resposta a

alarmes e realização de outras atividades durante os procedimentos de planta ou ordens de trabalho.

2.4.2.2 Quantificação da probabilidade do erro humano

A probabilidade de erro humano (*Human Error Probability* – HEP) é calculada pelo produto de todos os oito PSFs. Portanto, a equação assume a seguinte forma, em que NHEP é a probabilidade de erro humano nominal:

$$HEP = NHEP \times \prod PSF \quad (2.1)$$

onde, NHEP assume valor de 10^{-2} para tarefas de diagnóstico, e de 10^{-3} para tarefas de ação.

No entanto, em situações altamente negativas, em que a tendência para erros humanos é alta, é possível que a atribuição dos níveis dos PSFs possa resultar em um valor da HEP total maior do que um. Nas versões anteriores, quando isso ocorria, os analistas eram orientados a arredondar o valor para um. Uma solução matemática foi desenvolvida para contornar esse problema por meio da inclusão de um fator de ajuste, o denominador da Equação 2.2. O guia prático NUREG-6883 sugere que o fator de ajuste seja usado em situações em que foram identificadas pelo menos três PSFs negativos (PSFs negativos estão presentes sempre que um multiplicador maior que um é selecionado).

$$HEP = \frac{NHEP \times \prod PSF}{NHEP \times (\prod PSF - 1) + 1} \quad (2.2)$$

Por outro lado, não foi desenvolvido nenhum fator de ajuste para PSFs positivos. A influência positiva da dependência não foi investigada e, portanto, não faz parte do método SPAR-H. O método SPAR-H também estabelece um limite inferior de 10^{-5} para HEPs, como mostrado na Figura 10.

As Equações 2.1 e 2.2 são válidas tanto para tarefas de diagnóstico quanto para tarefas de ação, o que modifica é apenas o valor da probabilidade de erro humano nominal (NHEP). Quando a tarefa envolve os dois tipos, ação e diagnóstico, os dois HEPs são calculados separadamente e depois somados para produzir o HEP combinado, ou seja:

$$HEP_{\text{combinado}} = HEP_{\text{Diagnóstico}} + HEP_{\text{ação}} \quad (2.3)$$

A documentação NUREG-6883 SPAR-H não limita a probabilidade da união de Diagnóstico e Ação, o que significa que é possível ter um valor superior a 1. No caso de um HEP de Diagnóstico e Ação combinado se aproximar ou exceder 1, a seguinte equação deve ser aplicada:

$$HEP_{\text{combinado}} = HEP_{\text{Diagnóstico}} + HEP_{\text{ação}} - (HEP_{\text{Diagnóstico}} \times HEP_{\text{ação}}) \quad (2.4)$$

Apesar de ter sido desenvolvida para o ambiente da indústria nuclear, essa técnica tem sido empregada em outros ambientes, como na indústria de frango (DÓREA, 2017), no processo de instalação de GLP (CONCEIÇÃO, 2016), na indústria de refino de petróleo (ÁVILA FILHO, 2015), entre outras. Por outro lado, é preciso que a resultante do método seja validada em conjunto com o *staff* da empresa para verificar se há uma necessidade de ajuste (calibração) dos multiplicadores da probabilidade de falha.

Além disso, nota-se que a maioria dos PSFs avaliados por essa técnica está sob o domínio da organização. Isso pode sugerir que mudanças no ambiente organizacional podem influenciar (negativamente ou positivamente) os multiplicadores. Portanto, faz-se necessário uma avaliação da existência de elementos que potencializem essa mudança ou realizem análises considerando cenários diferentes. Esse último caso se torna interessante em projeto de sistemas.

Considerando a diversidade dos fatores (técnicos, humanos e organizacionais) que influenciam o processo e a operação, o gerenciamento de riscos e da segurança tornou-se uma tarefa crítica para muitas indústrias, particularmente para àquelas que são altamente tecnológicas (JOHNSEN; KILSKAR; FOSSUM, 2017). Apesar do desenvolvimento de várias técnicas e metodologias de análises de falhas e o desenvolvimento de sistemas de proteção, os problemas relacionados à segurança têm sido uma questão constante para as indústrias (KNEGTERING; PASMANN; 2009).

Nesse contexto, a aplicação de forma isolada de técnicas de análise de risco e de investigação de falhas pode não ser suficiente para dar o direcionamento mais assertivo da causa raiz do problema e/ou estabelecer salvaguardas mais eficientes para o sistema (ÁVILA FILHO, 2015). Portanto, sugere-se a integração de técnicas em uma mesma metodologia que seja capaz de tratar a natureza sociotécnica do sistema.

Seguindo a visão de falha sistêmica e de que o risco operacional é dinâmico, Ávila Filho (2015) apresenta um novo modelo de gerenciamento através da integração de ferramentas de confiabilidade. Nessa discussão, Ávila Filho apresenta quatro áreas de domínio da confiabilidade que avalia aspectos da operação, processo, manutenção e fatores humanos. Assim, este trabalho apresenta uma discussão de falhas em sistema sociotécnico através da aplicação de ferramentas de confiabilidade em um estudo de caso real de uma indústria de fertilizantes.

CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo encontra-se a descrição da metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho. Serão aqui abordados o método e os materiais utilizados para a obtenção dos resultados. A realização deste trabalho se baseou em um estudo de caso aplicado em uma instalação industrial com processos químicos complexos com elevado risco operacional. Neste estudo de caso foi analisada a confiabilidade de equipamentos rotativos e a influência dos fatores humanos no desempenho da operação da máquina. Por questões de mútuo acordo entre a empresa parceira e o autor, algumas informações foram apresentadas de forma que não fosse possível a identificação do local de trabalho.

3.1 METODOLOGIA PROPOSTA

A Figura 11 esquematiza a visão geral da metodologia empregada no estudo de caso para caracterização da falha no formato sociotécnico.

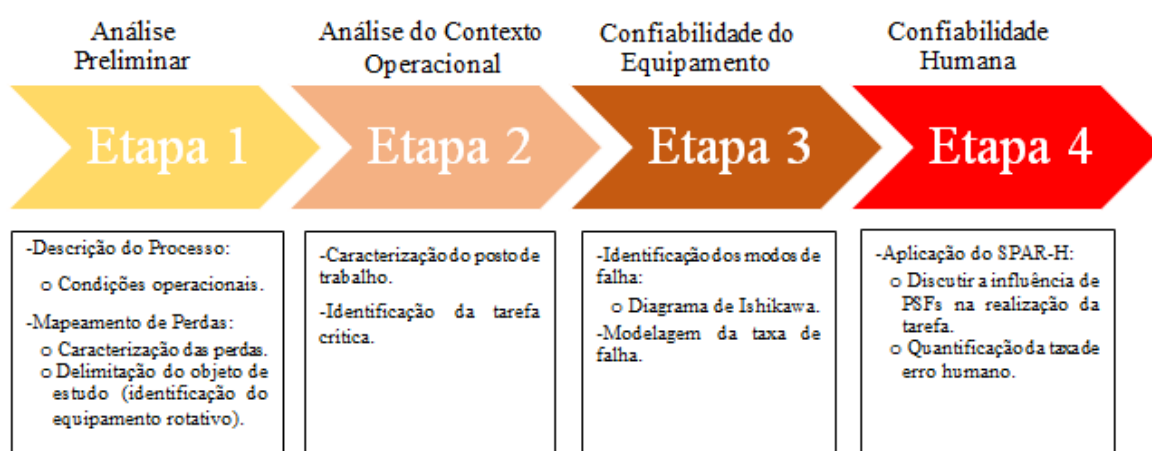


Figura 11 – Fluxograma das atividades da metodologia.

Em geral, as consequências de uma falha são fáceis de identificar, mas a construção da história da falha (relação causa-efeito) depende do entendimento do processo nas condições normais e, sobretudo, das anormalidades. Assim, o primeiro passo da investigação (Etapa 1, Figura 11) é o estudo da condição normal de operação – essa poderá fornecer a identificação de variáveis e equipamentos críticos e um diagnóstico preliminar da complexidade do sistema (níveis de interligação entre sistemas principais e auxiliares, correntes de reciclo etc.).

O passo seguinte objetivou delimitar o objeto de estudo, isto é, identificar um equipamento crítico sob o qual será realizada a caracterização da falha no formato

sociotécnico. Para alcançar esse objetivo foi realizado o estudo da perda de produção do macroprocesso (toda a unidade) até o microprocesso (por equipamento). Inclui-se também nessa etapa a descrição das principais características do equipamento para auxiliar no entendimento da falha.

Na etapa 2, realizou-se a análise do contexto operacional com o objetivo de identificar os principais elementos que afetam o desempenho da operação, identificar uma tarefa crítica e classificar o nível de complexidade da operação do sistema de compressão de CO₂. Para alcançar esses objetivos foram analisados os seguintes aspectos: a existência de procedimentos operacionais padrão e o seu cumprimento na realização das atividades da operação, o nível de automação, o impacto do acompanhamento de sistemas auxiliares na rotina operacional do sistema principal e do nível de interligação do sistema em análise (número de linhas de reciclo).

A terceira etapa deste trabalho consta da elaboração do diagrama de Ishikawa e da modelagem do comportamento do equipamento por meio da aplicação da confiabilidade. A construção do diagrama de Ishikawa teve como objetivo apresentar a relação existente entre um resultado negativo (nesse caso, a perda de eficiência do equipamento e/ou parada) e os fatores (causas) que poderiam afetar o resultado considerado. O resultado dessa análise foi comparado com o comportamento obtido na modelagem da função taxa de falha.

As informações obtidas nas etapas anteriores serviram como base para a aplicação da análise da confiabilidade (SPAR-H) utilizada na última etapa. Esse método consiste na análise quali-quantitativa de oito fatores de desempenho humano (PSFs) que têm como resultante final a quantificação da taxa do erro humano para uma determinada tarefa.

Durante todo o processo foram realizadas várias visitas à empresa. A aplicação das técnicas teve a participação de funcionários de diferentes níveis hierárquicos (operadores, supervisor, engenheiros e gerentes). A construção da árvore de falha e do diagrama de Ishikawa, por exemplo, teve contribuição direta desses profissionais, sendo necessária, no entanto, a complementação e a discussão com dados da literatura. Outras técnicas também estão envolvidas na construção dos resultados, mas geralmente aplicadas em conjunto com outras ferramentas como, por exemplo, *brainstorming* e Diagrama de Pareto.

3.1.1 Etapa 1 – Análise Preliminar

Essa primeira etapa se iniciou com o estudo do processo com a leitura de manuais de operação da unidade e visitas técnicas à área com o objetivo de realizar uma avaliação preliminar para identificar os equipamentos rotativos críticos e suas condições de operação (influência das variáveis de processo). A delimitação do objeto de estudo, isto é, do equipamento crítico, foi realizada a partir do mapeamento de perdas por meio da construção de diagramas de Pareto.

Espera-se que a unidade em estudo produza uma quantidade superior a mil toneladas de produto, por dia. Toda produção que esteja abaixo dessa meta é classificada como perda e um registro é realizado pela gerência para acompanhamento em relatórios. Esse relatório, que apresenta o discurso gerencial de todos os eventos ocorridos na unidade, foi a principal fonte de dados para a quantificação e classificação das perdas de produção. A coleta de informações foi obtida por meio de relatórios de turnos, do manual de operação da unidade e visitas na área. Assim, o mapeamento da perda seguiu as seguintes etapas para delimitação do objeto de estudo:

1. Perda de produção global da unidade – perdas devido aos seguintes fatores: problemas em equipamentos (EQ); paradas programadas (PP); falta de utilidades (UTL); greve (GRV); outros eventos internos (EI); folga (FG); problemas no suprimento da carga (SC); e outros eventos externos (EE);
2. Perda de produção devido a equipamentos rotativos – comparação entre equipamentos rotativos e todos os outros equipamentos da unidade;
3. Discriminação da participação de bombas, compressores, ventiladores e sopradores na perda de produção.

Identificado o equipamento crítico, o próximo passo foi a descrição do sistema e do equipamento em estudo (condições operacionais e elementos constituintes). Essa etapa é responsável por informar qual a importância do equipamento no processo; qual o impacto em caso de parada e/ou perda de eficiência; quais variáveis críticas têm o potencial de afetar o processo/produção e o desempenho do equipamento; e qual é a descrição do sistema principal e auxiliar. O fluxograma apresentado na Figura 12 esquematiza o método empregado, as fontes de dados e as resultantes dessa primeira etapa. A Figura 13 detalha o processo de mapeamento de perdas.

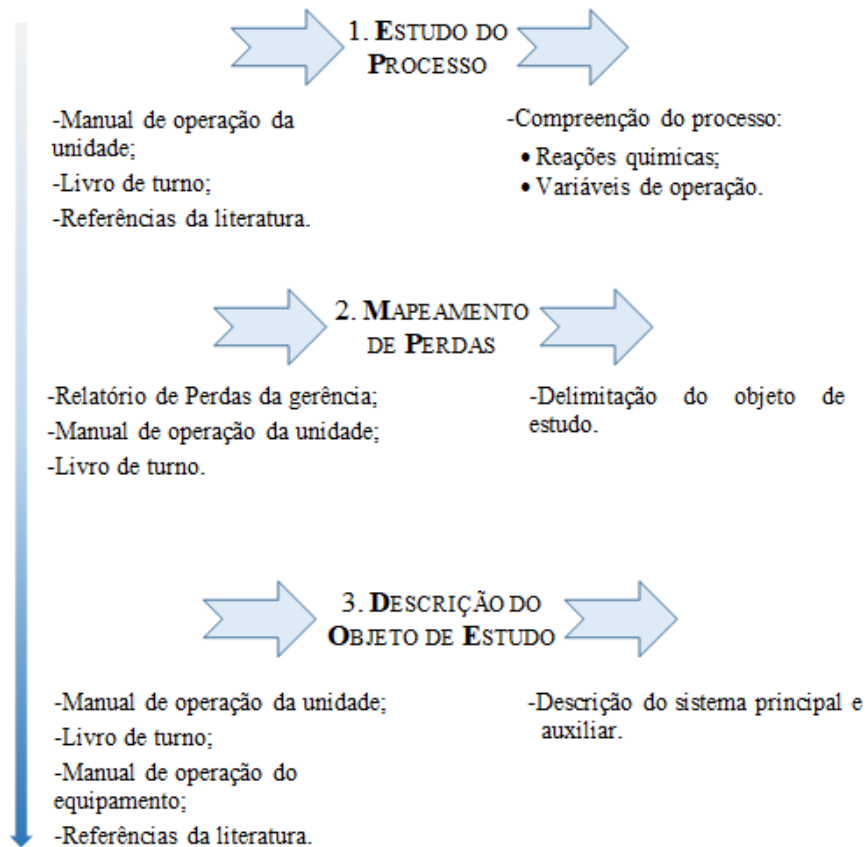


Figura 12 – Metodologia utilizada na primeira etapa.

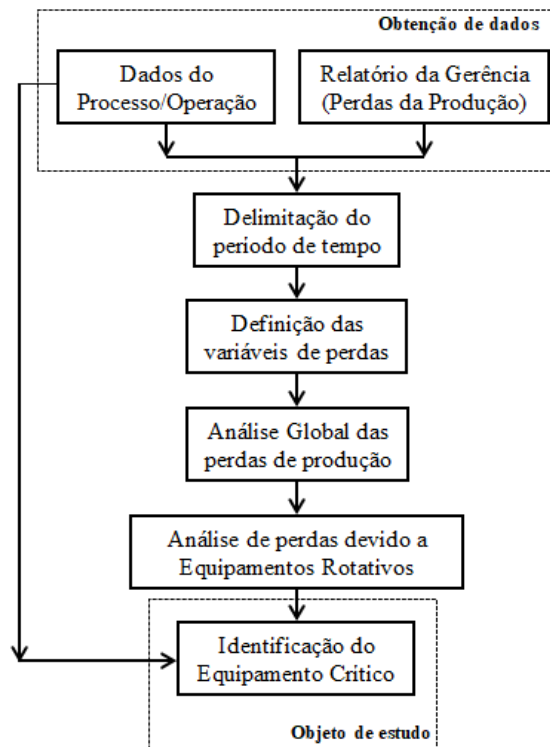


Figura 13 – Diagrama de blocos do mapeamento de perda para delimitação do objeto de estudo.

3.1.2 Etapa 2 – Análise da Tarefa (Contexto Operacional)

A análise da tarefa realizada neste trabalho se baseou na metodologia proposta por Ávila Filho (2013b), que visa identificar elementos que maximizem ou minimizem o desempenho humano no contexto operacional e, assim, oferecer base para aplicação das outras duas ferramentas de confiabilidade – a confiabilidade de componentes e confiabilidade humana.

A estrutura metodológica utilizada para essa ferramenta é constituída das seguintes etapas:

1. Descrição do posto de trabalho;
2. Análise de aspectos de SMS;
3. Análise da tarefa de operação (nível de complexidade):
 - 3.1 Cumprimento dos procedimentos operacionais padrão;
 - 3.2 Nível de automação do processo;
 - 3.3 Caracterização do sistema principal e auxiliar – relação entre as tarefas principais e as secundárias;
 - 3.4 Nível de linhas de reciclo do processo – relação entre sistema principal e auxiliar.

Com exceção do primeiro e do segundo item, descrição do posto de trabalho e análise de aspectos de SMS, respectivamente, todos os outros são originados do trabalho de Ávila. A incorporação dessas etapas foi julgada como importante devido às condições de operação da unidade e da modificação do posto de trabalho em função da automação. Nesta segunda etapa as análises foram realizadas com base em documentos internos da empresa (manual de operação do sistema de compressão, procedimentos operacionais e relatórios de turno), além de entrevistas com o *staff* da operação (gerente de operação, engenheiro de processo, supervisor e operadores de campo e painel).

Para auxiliar as entrevistas foram elaborados dois formulários, ambos estão mostrados nos Apêndices G e H. O primeiro formulário está estruturado em forma de perguntas, portanto, requer um maior tempo de resposta e foi aplicado pelo autor deste trabalho de forma presencial. Dessa forma o formulário presente no Apêndice G foi aplicado apenas com um operador de campo e um supervisor. O segundo formulário foi enviado por e-mail e contou com a colaboração de um engenheiro de processo, um engenheiro mecânico, o gerente da operação e o gerente da mecânica, um supervisor e um operador de painel. Esses mesmos

formulários também foram usados para auxiliar as etapas seguintes, principalmente na aplicação do método SPAR-H.

3.1.3 Etapa 3 – Diagrama de Ishikawa e Confiabilidade de Componentes

O processo de análise da confiabilidade do sistema teve início com a construção do diagrama de Ishikawa para o levantamento e a discussão dos elementos que têm algum potencial de impactar o desempenho do equipamento rotativo. Posteriormente a essa análise, foi realizada a modelagem matemática do sistema (caracterização da taxa de falha) para a avaliação do comportamento do equipamento.

3.1.3.1 Diagrama de Ishikawa

O diagrama de Ishikawa, ou diagrama de causa e efeito, foi popularizado nos anos 1960 por Kaoru Ishikawa, seu criador. Ishikawa é considerado um dos pais da gestão moderna, área na qual prestou grandes contribuições ao campo do controle e garantia da qualidade (LILIANE, 2016). O diagrama de causa e efeito é também conhecido como diagrama de “espinha de peixe” devido a sua forma semelhante a um esqueleto de peixe, conforme ilustrado na Figura 14.

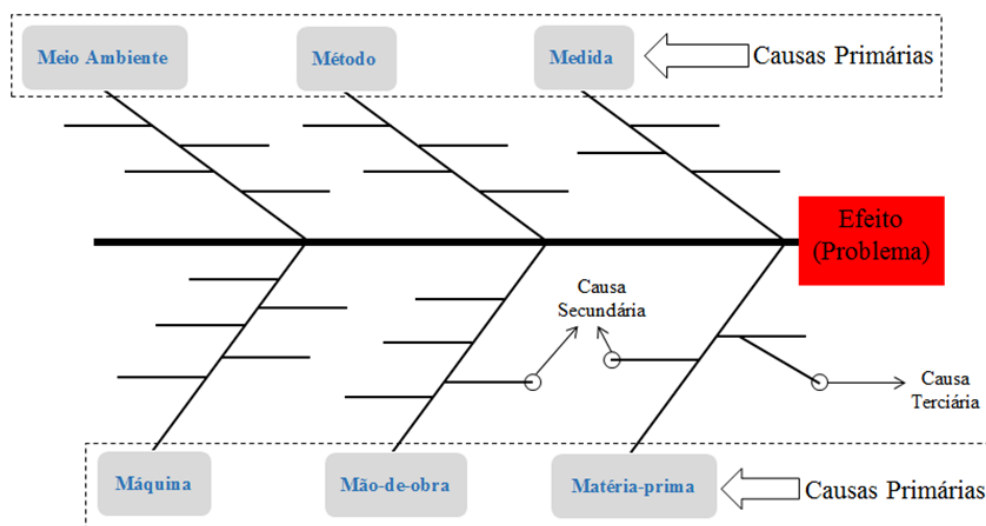


Figura 14 – Modelo do diagrama de Ishikawa ou diagrama de causa e efeito.

Utilizado em conjunto com a técnica de *brainstorming* em trabalhos de grupo, as potenciais causas de falhas são agrupadas por afinidade em seis elementos, conhecidos como os 6M's: meio ambiente, método, medida, máquina, mão-de-obra e matéria-prima (LUNA, 2013). Atualmente, o diagrama de causa e efeito pode apresentar elementos diferentes em

termos de quantidade de grupos (menor ou maior que os 6M's) e/ou nomenclaturas distintas da forma originalmente proposta por Ishikawa. Tal flexibilidade é um dos fatores que lhe confere uma alta aceitação e aplicação no meio organizacional.

A presença de elementos de diferentes domínios, como o fator humano, ainda que de forma sutil, mostra porquê de Kaoru Ishikawa ser considerado um dos pais da gestão moderna. Assim, é possível destacar que o diagrama de Ishikawa é uma das poucas técnicas que, independentemente de sua eficácia e profundidade nos temas não técnicos, consegue reunir em uma única abordagem uma discussão dos fatores técnicos, humanos e organizacionais.

As etapas para a construção do diagrama de espinha de peixe são as seguintes:

- 1) Descrever resumidamente o problema a ser analisado dentro de um retângulo no lado direito;
- 2) Traçar a espinha dorsal e elencar em outros retângulos (posicionados nas extremidades das linhas que partem da espinha dorsal) os elementos que farão parte da análise (mão de obra, matéria-prima, método etc.);
- 3) Realizar o *brainstorming* para o levantamento de todas as possíveis causas e relacioná-las com as causas primárias. Quando necessário, classificá-las em causas terciárias, quaternárias etc.;
- 4) Investigar todas as causas citadas e identificar as causas que parecem exercer um efeito mais significativo sobre o problema analisado.

3.1.3.2 Confiabilidade de componentes

Uma vez identificadas as causas dos modos de falha no diagrama de Ishikawa, a próxima etapa é a de estimação de parâmetros e seleção do modelo que melhor descreva o comportamento do sistema. A seleção do modelo levará em conta testes estatísticos, análises gráficas e a caracterização da falha realizada no diagrama de Ishikawa.

O método empregado para estimação de parâmetro baseia-se no trabalho desenvolvido por Santana (2014), que utiliza a função objetivo de Mínimos Quadrados Ponderados (WLS, do inglês, *Weighted Least Squares*) e o método de Otimização por Exame de Partícula (PSO, do inglês, *Particle Swarm Optimization*) para solução de estimação de parâmetro. Nesse contexto, as etapas utilizadas foram:

1. Histórico dos modos de falha (diagrama de Ishikawa) – caracterização do tipo de falha, isto é, se as falhas estão relacionadas ao fenômeno de desgaste, aleatório, ao projeto inadequado etc.;
2. Obtenção e mineração dos dados de falha (tempo entre falhas) – os dados correspondem a períodos de manutenção corretiva, sendo necessário eliminar dados relacionados a intervenções da manutenção preventivas;
3. Definição do estimador da probabilidade de falha;
4. Pré-seleção das funções de densidade de probabilidade;
5. Resolução do problema de estimação de parâmetro – método PSO;
6. Avaliação da qualidade do modelo e dos parâmetros. Essa etapa possui o seguinte tratamento: valor da função objetivo (teste χ^2); coeficiente de determinação do modelo; análise dos resíduos; avaliação da matriz de covariância e da matriz de correlação dos parâmetros;
7. Criação dos gráficos da função taxa de falha.

Como é possível observar, nessa etapa buscou-se utilizar mais de um teste para avaliar a qualidade do processo de estimação de parâmetros, o que inclui a análise da qualidade do ajuste do modelo e dos parâmetros. Assim, para realizar uma análise estatística mais robusta recorreu-se ao procedimento utilizado por Santana (2014) que utiliza a função objetivo WLS. Conseqüentemente, para alcançar tal objetivo foi necessário utilizar um método heurístico para solução do problema de otimização que fosse capaz de atender a essa demanda, o que justifica a escolha do método de exame de partícula. A estimação dos parâmetros e os testes estatísticos foram realizados no Python[®]. A Figura 15 apresenta o diagrama de blocos da metodologia utilizada nessa etapa.

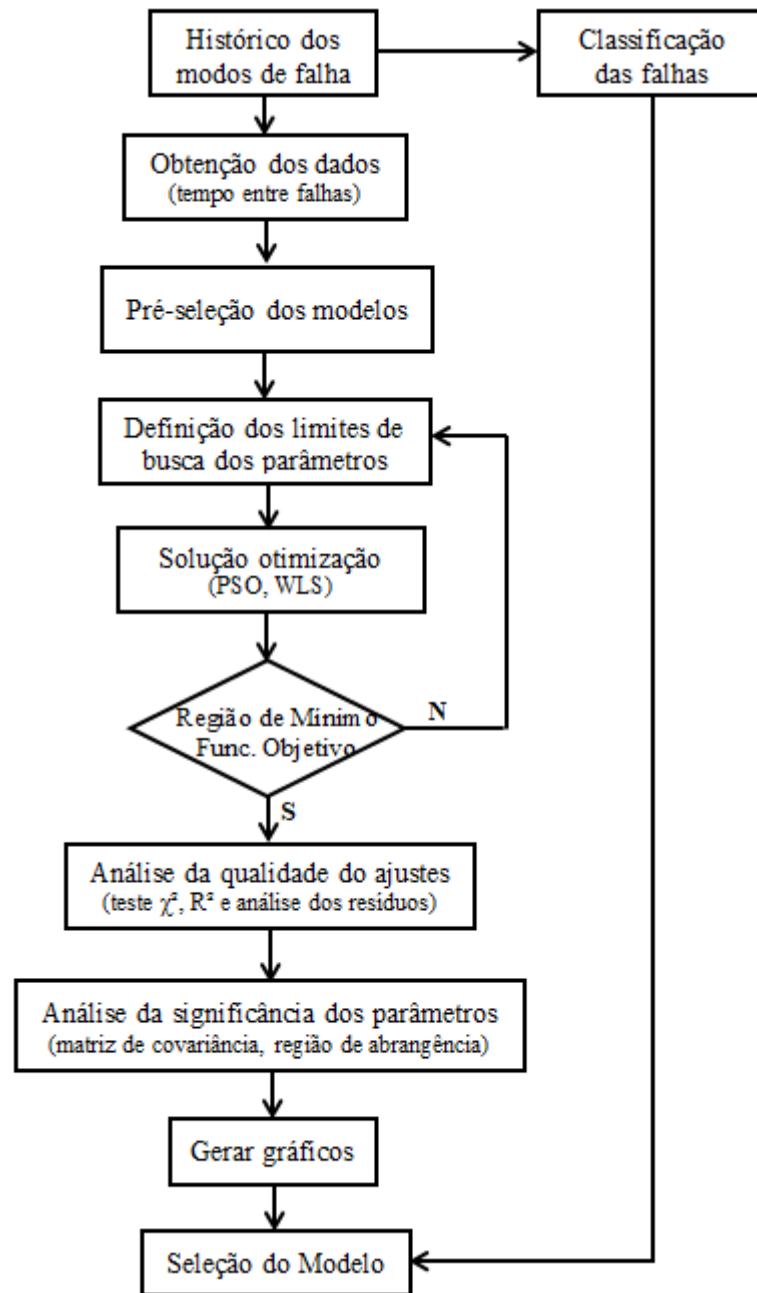


Figura 15 – Diagrama de bloco da etapa da análise de confiabilidade.

3.1.4 Etapa 4 – Confiabilidade Humana

Devido à existência de diversos fatores que agem sobre os indivíduos e que influenciam na falha de sistema técnico, os estudos em confiabilidade humana foram iniciados apenas após a identificação e o estudo do equipamento crítico – o que inclui a análise da confiabilidade de equipamentos e da confiabilidade operacional. Sendo este último seguindo a metodologia de Ávila Filho (2015).

A análise da confiabilidade humana utilizada neste trabalho foi realizada por meio do método SPAR-H com base no manual elaborado pela Comissão Reguladora Nuclear Norte Americana – NUREG-6883 (2005). Esse método permite quantificar a taxa de erro humano através de avaliações realizadas nos fatores de desempenho humano (PSFs) com base na observação da tarefa em estudo e em entrevistas (ver Apêndices G e H) com quem realiza a atividade e/ou a supervisiona. Apesar de alguns autores considerarem a existência de mais de 50 PSFs, esse método leva em conta apenas oito, quais sejam: tempo disponível, estresse e estressores, complexidade, experiência e treinamento, procedimentos, ergonomia (interface homem-máquina), aptidão para o serviço e processos de trabalho.

A aplicação desse método foi auxiliada por um operador de campo com experiência superior a dez anos de profissão, mas que estava apenas há dois anos na unidade de estudo. Nessa etapa foram seguidos todos os passos necessários para aplicação do método SPAR-H, quais sejam:

1. Identificação da tarefa e do contexto do evento básico em análise;
2. Análise se o evento básico envolve diagnóstico, ação ou ambas (diagnóstico e ação);
3. Atribuição de valores quantitativos a cada um dos PSFs para o cálculo da probabilidade do erro humano (HEP) para cada tipo de tarefa (ação e/ou diagnóstico) em diferentes cenários;
4. Determinação da HEP sem dependência. Se houver três ou mais PSF negativos, aplicação do fator de ajuste;
5. Cálculo da HEP total, usando a HEP para o diagnóstico, HEP para ação, ou a HEP diagnóstico-ação;
6. Análise dos resultados.

A Figura 16 apresenta o diagrama de blocos da metodologia utilizada para o cálculo da taxa de erro humano.

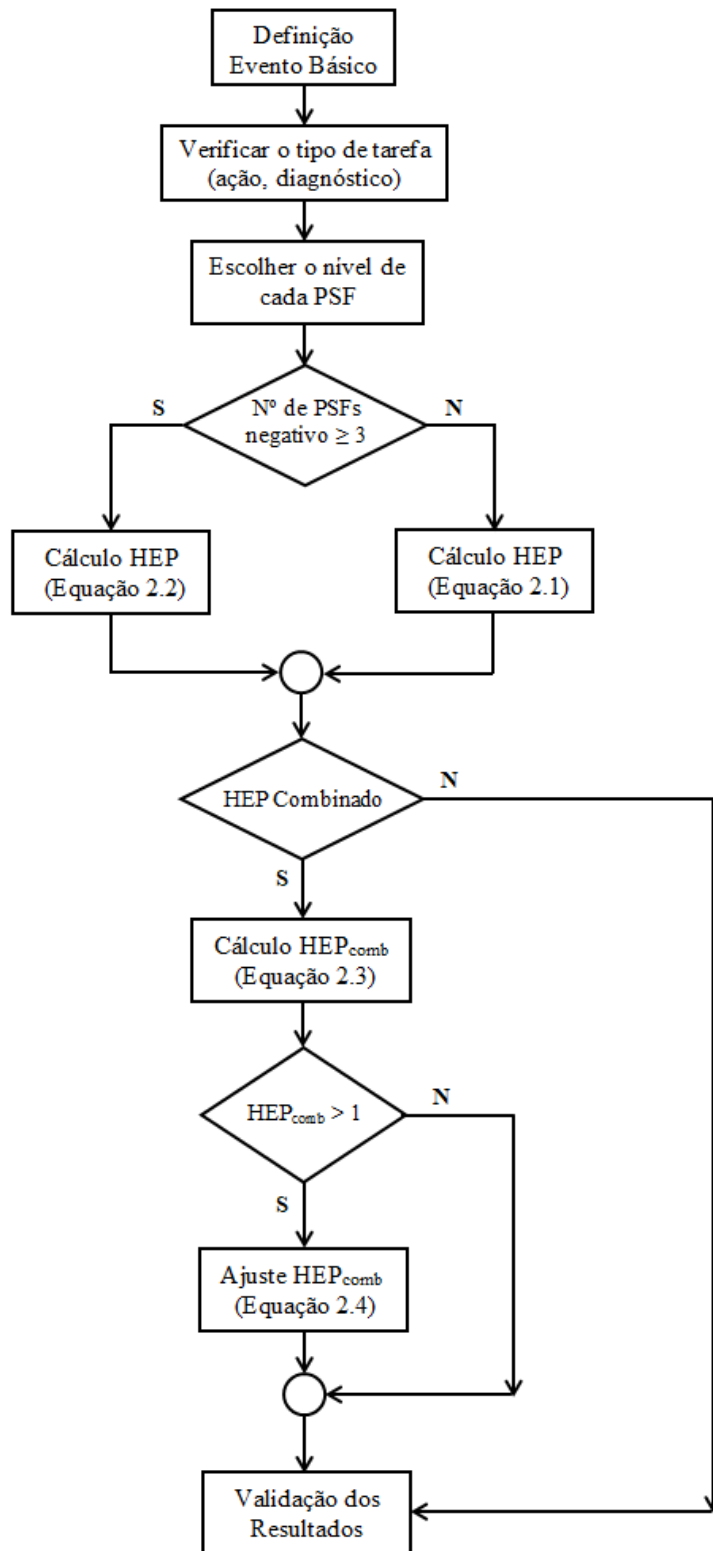


Figura 16 – Metodologia utilizada para o cálculo da taxa de erro humano.

A validação dos resultados foi realizada em conjunto com o operador e o gerente de operação da unidade. A sensibilidade dos entrevistados quanto ao resultado pode servir de ajuste do modelo para avaliação de outros cenários nos quais são identificados fatores que podem influenciar uma mudança de níveis dos PSFs analisados.

CAPÍTULO 4. CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O presente estudo de caso foi realizado a partir de uma aplicação da metodologia proposta a uma unidade de uma indústria petroquímica de alta complexidade. O estudo iniciou-se com a compreensão do processo produtivo para identificação de variáveis críticas para operação. Após esse diagnóstico preliminar, a análise seguinte consistiu do estudo da perda de produção para delimitação do objeto de estudo e, subsequentemente, aplicação das técnicas de caracterização da falha em seu formato sociotécnico.

4.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

O processo de fabricação da ureia pode ser separado em três etapas: (i) síntese, (ii) decomposição e recuperação, (iii) concentração e granulação. A primeira etapa se refere ao processo de fabricação do carbamato de amônia por meio da reação entre o dióxido de carbono e o amoníaco. O produto final (ureia) é processo de desidratação do carbamato. Na saída do reator estão presentes a ureia e os reagentes não convertidos (CO_2 e amoníaco), além de quantidades de biureto (produto indesejável). Assim, na segunda etapa, os produtos não convertidos são separados e recuperados. Após isso, na última etapa, é realizado o processo de concentração da ureia, pelo qual se torna possível efetuar a granulação que segue para a comercialização. A Figura 17 esquematiza a forma simplificada do processo de produção da ureia.

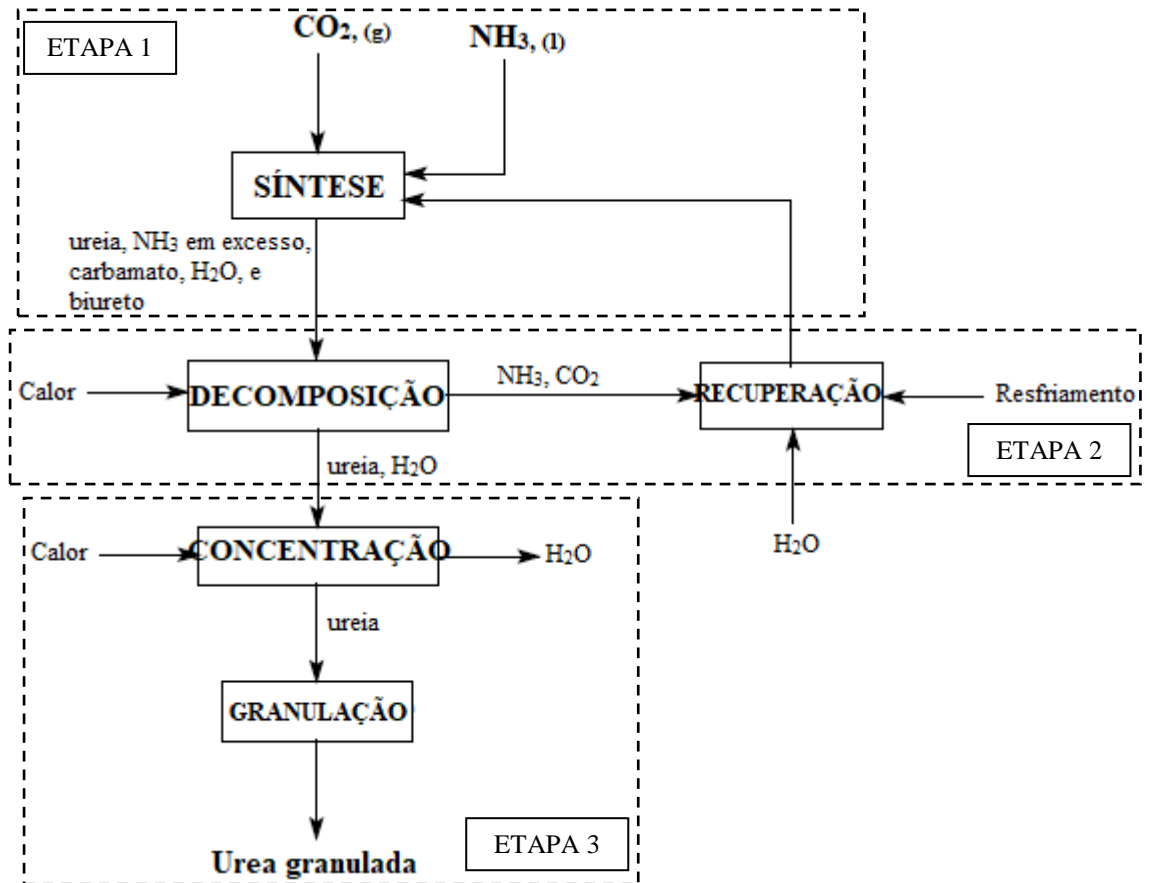


Figura 17 – Processo industrial simplificado de fabricação da ureia.

Fonte: Adaptado de NZIC (2008).

a) Etapa 1: síntese

A síntese da ureia é a fase inicial do processo de produção. A reação de formação da ureia se processa em duas etapas:

- 1ª reação - formação exotérmica do carbamato de amônia.



- 2ª reação - desidratação endotérmica do carbamato de amônia em ureia



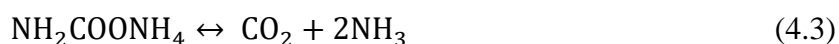
A conversão do carbamato de amônio em ureia é maximizada na fase líquida e as reações se processam a pressões e temperaturas elevadas. Partindo do princípio de equilíbrio químico de Le Chatelier, a presença de água diminui a conversão em ureia, enquanto o excesso de NH_3 facilita esta conversão. Pelo fato das reações reversíveis serem uma exotérmica e a outra endotérmica, a pressão e temperatura também interferem no equilíbrio das reações, assim como a composição da carga e o tempo de residência no reator.

A forma de injeção das matérias-primas (CO₂ e NH₃) depende do tipo de tecnologia do processo – podem ser injetadas diretamente no reator ou em um vaso misturador antes de seguir para o reator. A amônia líquida proveniente da unidade de amônia é pré-aquecida, bombeada e tem sua pressão elevada para as condições específicas do processo. O dióxido de carbono geralmente é proveniente de outra unidade (por exemplo, da planta de amônia), sendo transferido até a unidade de ureia por compressores centrífugos e/ou alternativos. Usualmente se faz necessário a purificação do dióxido de carbono se o gás contiver mais que 2 % em volume de inertes e/ou 25 ppm de enxofre, pois esses componentes afetam o equilíbrio da conversão, requerendo, com isso, elevadas pressões. Uma solução de reciclo resultante do processo de decomposição e recuperação é encaminhada ao reator.

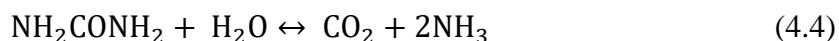
Os efluentes do reator seguem para a área de decomposição e recuperação dos reagentes não convertidos. Nessa etapa, são realizadas a decomposição do carbamato de amônio que não foi transformado em ureia, a evaporação de parte da amônia em excesso da solução de ureia e a separação da amônia gasosa e do dióxido de carbono liberados no líquido remanescente.

b) Etapa 2: decomposição e recuperação

Nessa etapa, a quase totalidade da amônia em excesso e o carbamato de amônio não convertido são separados da solução de ureia e recuperados. O carbamato de amônio não reagido, o excesso de amônia e a água são removidos pela aplicação de calor e redução do nível de pressão. A decomposição da amônia segue a seguinte reação:



Durante a decomposição também ocorrem dois fenômenos indesejados: a hidrólise de ureia e a formação de biureto. Na hidrólise da ureia há transformação do produto final nas matérias primas iniciais, NH₃ e CO₂:



Assim, as condições da área devem ser tais que minimizem este fenômeno, evitando-se perdas do produto. A hidrólise é favorecida pela alta temperatura, baixa pressão e longo tempo de residência. Por outro lado, a baixa pressão parcial de amônia e em temperaturas acima de 90 °C, a ureia se decompõe para formar amônia e biureto, de acordo com a reação a seguir:



Na seção de síntese, porém, o excesso de amônia ajuda a manter baixo o teor desse produto. Os componentes recuperados na seção de recuperação são reciclados para a etapa de síntese e a ureia formada segue para a etapa de concentração e granulação.

c) Etapa 3: concentração e granulação

A ureia vinda da área de decomposição é enviada a filtros de solução de ureia para remoção de alguns contaminantes (óleo, metais oxidados, outros), sendo então enviada para o concentrador a vácuo onde é concentrada, gerando cristais em suspensão. Em seguida, a solução é aquecida para redissolver estes cristais antes da evaporação. Na área de evaporação, a umidade é removida pelo ar quente que flui em contracorrente.

Nos evaporadores a solução é concentrada para mais de 99,7 % em peso, pelo aquecimento com vapor e ar quente. Um controle do fluxo de ar é necessário, pois seu excesso aumenta a perda de ureia através do topo dos evaporadores e a redução deste causa elevação de umidade na ureia fundida. Da evaporação, a ureia fundida segue para a granulação. O produto final é arrefecido no ar, pesado e transportado para armazenamento a granel, quando fica pronto para venda.

O produto final pode resultar em três tipos de ureia, cada um com legislação específica: *premium*, fertilizante e industrial. Além desses, existe ainda a produção de ureia líquida de alta pureza por meio de uma modificação no processo descrito anteriormente.

4.2 SISTEMA DE COMPRESSÃO DO CO₂

O sistema de compressão do CO₂ é composto por quatro compressores, dois compressores alternativos idênticos movidos a motor elétrico e dois compressores turbinados, sendo um centrífugo e um alternativo. O processo de compressão é realizado em duas unidades da planta: parte do CO₂ é comprimida na planta de ureia (cerca de 56 % em volume do total) com participação de três compressores (um compressor *booster* C-01, e dois alternativos C-02/03) e o restante (44 %) será comprimido na planta de hidrogênio por outro compressor alternativo (C-04). A Figura 18 mostra de forma simplificada o sistema de compressão.

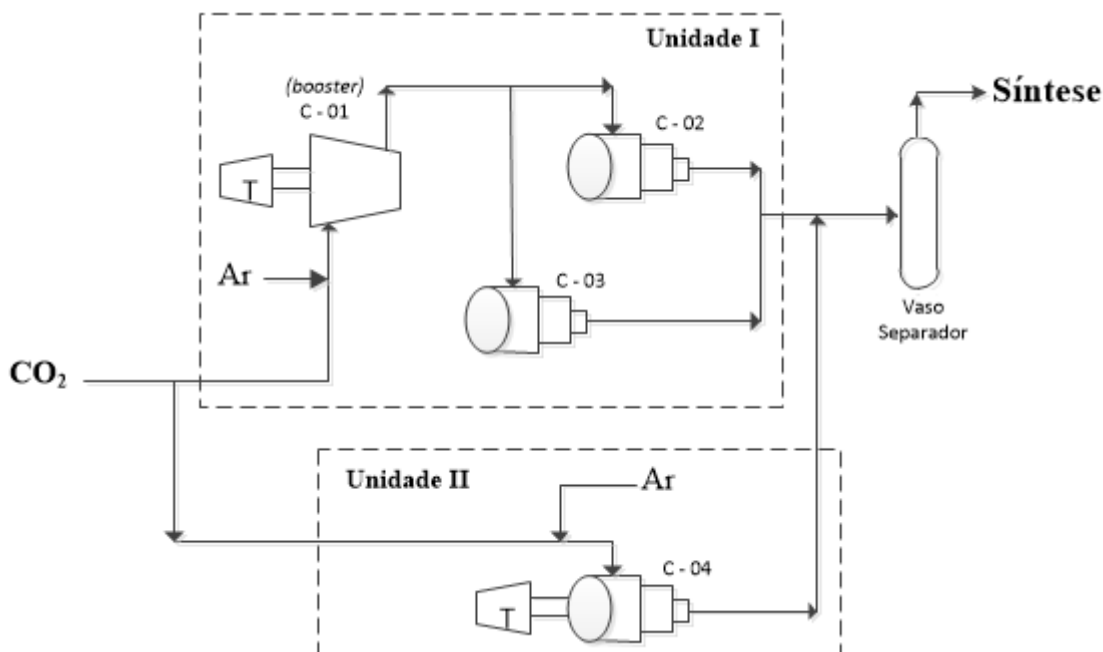


Figura 18 – Sistema de compressão de CO₂.

O CO₂ vindo da planta de amônia é distribuído para a alimentação do compressor centrífugo *booster* (C-01) e do compressor alternativo C-04. No *booster* ocorre a compressão em três estágios de 0,3 - 0,4 kgf/cm² até 4,0 - 4,5 kgf/cm² e, posteriormente, até 260 kgf/cm², em dois compressores alternativos (C-02/03) de quatro estágios, cada um com 28 % da capacidade da planta. Uma vazão de ar, equivalente a cerca de 2500 ppm de oxigênio, é injetada, na condição de capacidade nominal da planta, na sucção do C-01 e C-04 para apassar o aço inox e assim minimizar os efeitos corrosivos dos reagentes nos reatores e demais equipamentos. No compressor alternativo turbinado (C-04), o CO₂ é comprimido de 0,3 kgf/cm² até 275 kgf/cm² em cinco estágios.

A parada dos compressores não necessariamente implica na parada da planta. No entanto, a indisponibilidade desses compressores afeta diretamente a produção, isto é, reduz a capacidade da planta em 28 %, se um dos compressores alternativos C-02/03 parar; em 56 %, se o compressor *booster* falhar; e em 44 % se o compressor alternativo turbinado ficar indisponível. Nestes cenários de indisponibilidade dos equipamentos presume-se que o evento não ocasionou maiores perturbações ao processo a ponto de parar a planta.

4.2.1 Compressor Alternativo de Pistão Horizontal – Funcionamento e Características

O compressor C-02 é do tipo alternativo, constituído de cinco cilindros horizontais com acionamento a motor elétrico. O gás é recebido no primeiro estágio a uma pressão de 4,5

kgf/cm² e comprimido sequencialmente até o último estágio, de modo a atingir a pressão de descarga requerida para o processo, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Pressão e temperatura de sucção e descarga nos quatro estágios.

Variáveis Operacionais	1º Est.	2º Est.	3º Est.	4º Est.
Pressão de sucção (kgf/cm ²)	4,5	19,2	50	120
Temperatura de sucção (°C)	40	50	50	80
Pressão de descarga (kgf/cm ²)	19,4	51	122	260
Temperatura de descarga (°C)	153	128	127	141

Esse compressor utiliza um sistema biela-manivela para converter o movimento rotativo de um eixo no movimento translacional de um pistão e então elevar a pressão do gás. Dessa maneira, a cada rotação do acionador, o pistão efetua um percurso de ida e outro de vinda, estabelecendo um ciclo de operação. Por se tratar de um pistão de duplo efeito, o processo de compressão é realizado nesses dois movimentos (de ida e de vinda) do pistão. O Quadro 1 caracteriza os principais componentes do compressor e a Figura 19 esquematiza o fluxo de CO₂ nesse equipamento.

Quadro 1 – Pressão e temperatura de sucção e descarga nos quatro estágios.

Característica	Descrição
Eixo de Manivelas	O eixo de manivelas aciona seis bielas, assim distribuídas: duas no 1º estágio, uma no 2º estágio, uma no 3º estágio, uma no 4º estágio e uma utilizada para balancear as forças.
Cilindro	São do tipo horizontal, sendo cinco cilindros ao todo. Dois no primeiro estágio, e um nos outros estágios. São dotados de sistema de lubrificação independente e refrigerados com condensado de processo.
Pistão	São de duplo efeito – exceto no 4º estágio que é de simples efeito.
Selagem do Gás	Engaxetamento. Este sistema veda o gás proveniente da câmara de compressão do cilindro em direção à carcaça.
Sistema de Lubrificação	Pode ser dividido em dois: lubrificação de cilindros e caixa de gaxetas através da bomba manzel; e lubrificação dos mancais do eixo de manivelas, que também lubrifica as guias de cruzetas.
Controle de Capacidade	Bypass - descarga do 1º estágio para sucção do 1º estágio.

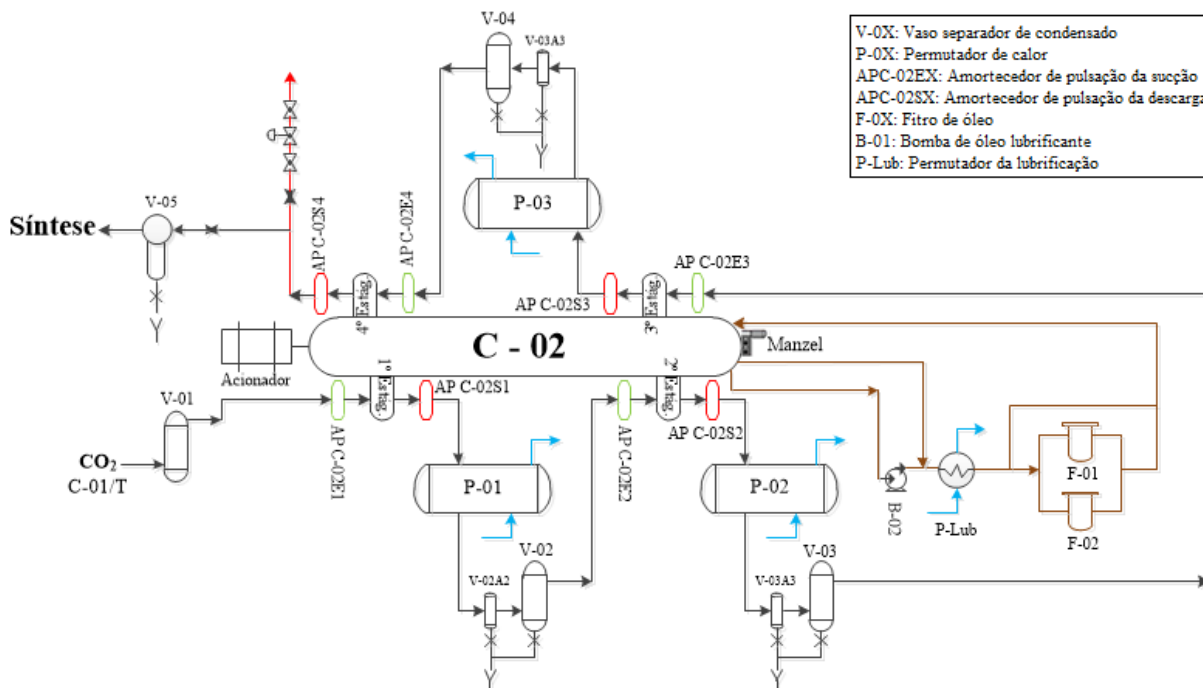


Figura 19 – Fluxo de CO₂ no compressor alternativo.

Como mostrado na Figura 19, o compressor *booster* (C-01) envia o CO₂ para o vaso de sucção (V-01) do primeiro estágio do C-02. Antes de entrar nas câmaras de compressão de cada estágio, o gás passa por um sistema de amortecedor de pressão (APC-02EX); o mesmo ocorre à jusante da válvula de descarga de cada estágio (APC-02SX). A pressão da sucção é monitorada promovendo o *trip* da máquina quando a pressão atinge 2,0 kg/cm².

Ao ser comprimido no primeiro estágio o CO₂ sai do APC-02S1 com 19,4 kg/cm² e a 153 °C. O CO₂ é subsequentemente resfriado a 50 °C após trocar calor com a água de resfriamento (AGR) no P-01. O gás efluente do P-01 vai ao vaso separador da descarga do 1º estágio (V-02), onde é separado do condensado. Parte do CO₂ efluente do V-02 retorna ao vaso de sucção do 1º estágio (V-01). A outra parte vai ao amortecedor de pulsação da sucção do 2º estágio (APC-01E2).

Após o 2º estágio, o CO₂ alcança as seguintes características: 50,0 kg/cm² e 128 °C. O gás que sai do 2º estágio troca calor no P-02 com a AGR. Parte desta AGR, volta ao coletor de AGR quente e parte vai resfriar os cilindros do 1º estágio. Os permutadores entre estágios e amortecedores de pulsação possuem drenos para as operações de parada e partida do compressor.

O gás efluente do P-02 tem a temperatura de 50 °C e segue para o vaso separador de drenagem da descarga do 2º estágio (V-03). O gás separado do condensado segue para o amortecedor de pulsação na sucção do 3º estágio (APC-02E3). Uma vez comprimido no 3º

estágio, o gás vai ao amortecedor de pulsação da descarga do 3º estágio (APC-02S3) com as seguintes características: 122 kg/cm² e 127 °C.

Resfriado no P-03, de onde sai a 80 °C e com 120 kg/cm² para ser separado do condensado no vaso separador de drenagem da descarga do 3º estágio (V-04). Por fim, o CO₂ segue para o último estágio de compressão, vai ao amortecedor de pulsação da sucção do 4º estágio (APC-01E4). Após comprimido no 4º estágio, sai com nas seguintes condições: 260 kg/cm² e 141 °C. Após o amortecedor de pulsão da descarga do 4º estágio (APC-01S4), o CO₂ é destinado para área de síntese, passando antes pelo V-05 que ajudará a separar condensado e óleo.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados deste trabalho divididos em quatro seções:

- Mapeamento e caracterização de perda da produção para identificação do equipamento rotativo crítico do sistema de compressão de CO₂. Nessa seção é apresentado o impacto dos equipamentos rotativos na perda de produção;
- Análise do ambiente operacional para identificação dos elementos que têm o potencial de afetar as atividades da operação e identificação de uma tarefa crítica para aplicação do método SPAR-H;
- Identificação das causas que levam à indisponibilidade do equipamento e modelagem da taxa de falha. A interpretação estatística dos resultados do procedimento de estimação também é considerada como um objetivo nesta etapa;
- Análise da confiabilidade humana dentro de um contexto da tarefa específica. Nesta análise foram avaliados qualitativamente os fatores de desempenho humano que estão presentes na técnica SPAR-H para quantificação da probabilidade de erro humano.

5.1 ETAPA 1: MAPEAMENTO DE PERDA DA PRODUÇÃO

Além de analisar as perdas devido à falha total, também se faz necessário o estudo do impacto das falhas parciais para a identificação de sistemas críticos. Portanto, a delimitação do objeto de estudo tem como ponto de partida a análise da perda de produção.

A instalação industrial onde foi realizado o estudo guarda um sistema de identificação e classificação das perdas de processamento das unidades, que é atualizado periodicamente. Tais perdas são classificadas em internas e externas. São consideradas perdas internas aquelas ocorridas ou provocadas por ações operacionais, como, por exemplo, problemas em equipamentos (EQ), paradas programadas (PP), falta de utilidades (UTL), greve (GRV) e outros eventos internos (EI). Já as perdas externas são aquelas provocadas por ações ou sistemas que não estão sob a gestão da operação, tais como folga (FG), problemas no suprimento da carga (SC) e outros eventos externos (EE). As perdas de produção do período de 2011 a 2015, de acordo com essa classificação, estão apresentadas na Figura 20.

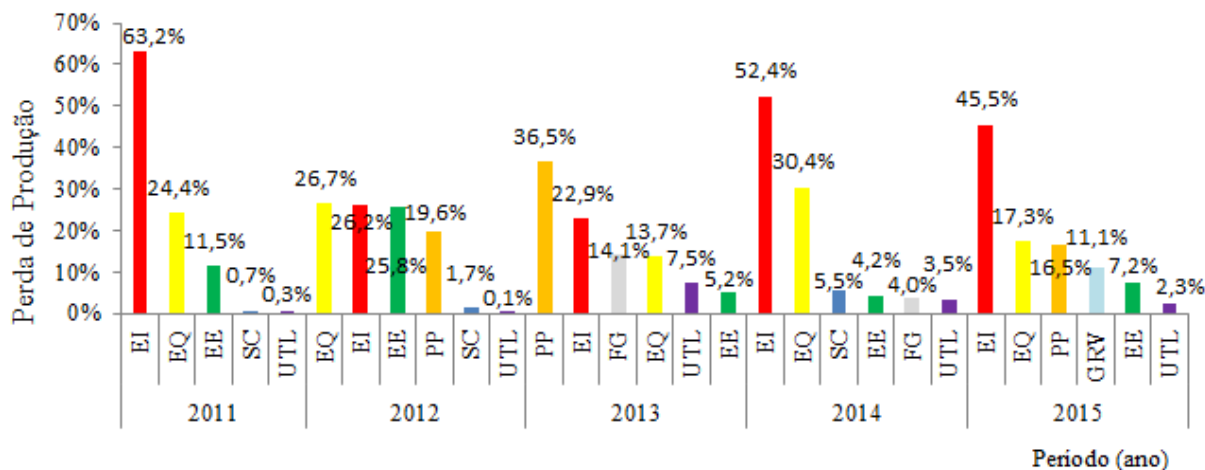


Figura 20 – Perda de produção por grupo.

Analisando a Figura 20, percebe-se que problemas em equipamentos (EQ) e outros eventos internos (EI) estão entre as principais causas de perda de produção na unidade de ureia, que inclusive podem ser superiores às perdas desencadeadas por paradas programadas – como ocorrido em 2012 e 2013. As perdas por equipamento estão relacionadas com indisponibilidade de equipamentos (*trip*, parada programada ou emergencial), baixa eficiência, realização de ajustes (por exemplo, serviços de desobstrução), abertura indevida de válvulas de alívio, entre outros.

A classificação de outros eventos internos (EI) refere-se a situações de interferência de outras unidades. Sabe-se que a instalação industrial apresenta alto grau de complexidade com forte interligação entre as unidades. Por exemplo, a planta de ureia utiliza como matéria-prima o gás dióxido de carbono e a amônia líquida, ambos provenientes da unidade de amônia. O amoníaco possui tanques de armazenamento, o que não acontece com o CO₂. Ou seja, problemas na amônia, se não resolvidos o quanto antes, paralisam a unidade de ureia por falta de matéria-prima. Falhas operacionais também estão inclusas nesta categoria de perda – por exemplo, *trip* de determinado equipamento (bomba, compressor, etc.) devido a alguma manobra operacional.

Uma forma alternativa de avaliar o impacto da perda de produção está mostrada na Figura 21, que ilustra a quantidade equivalente de dias de não produção. Problemas nos equipamentos (EQ) equivalem a uma média de 22 dias por ano de não produção, ou seja, 22 dias da unidade parada sem produzir nada.

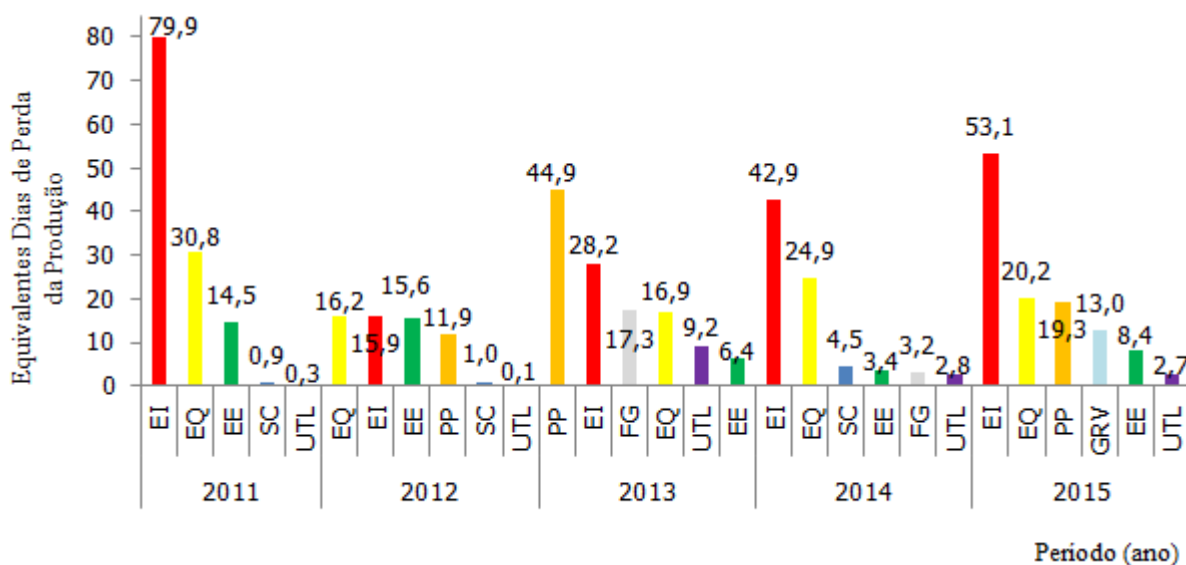


Figura 21 – Representação gráfica de equivalentes dias de perda da produção.

A Figura 20 e a Figura 21 mostram que as perdas ocasionadas por problemas nos equipamentos impactam diretamente no caixa da empresa. Plantas petroquímicas, como quaisquer outras de processo contínuo, são projetadas para operar 365 dias por ano, com exceção dos anos em que são planejadas as paradas para manutenção geral. Nesse cenário, os equipamentos rotativos possuem um papel de extrema importância para a indústria. Enquanto muitos equipamentos estáticos são vistos como o “coração” da indústria, os rotativos são vistos como “pulmão” dos processos.

Os equipamentos rotativos de processo para este tipo de indústria costumam ser máquinas de grande porte, responsáveis por movimentar e transferir todo o tipo de matéria (reagentes, produtos, utilidades etc.) em suas diferentes fases (líquida, vapor e gás). Assim, uma parada não programada de um equipamento desse tipo não significa necessariamente uma parada da planta, porém resulta na perda de “fôlego” para a produção (redução da carga).

Na unidade industrial em análise, os compressores de CO₂, as bombas de amônia líquida que alimentam o misturador antes do reator e as bombas de alimentação de solução de reciclo são os equipamentos rotativos mais importantes do processo. O percentual de perdas de todos os equipamentos rotativos (compressores, bombas, sopradores e ventiladores) em relação ao total de perdas por equipamento (EQ) está representado na Figura 22.

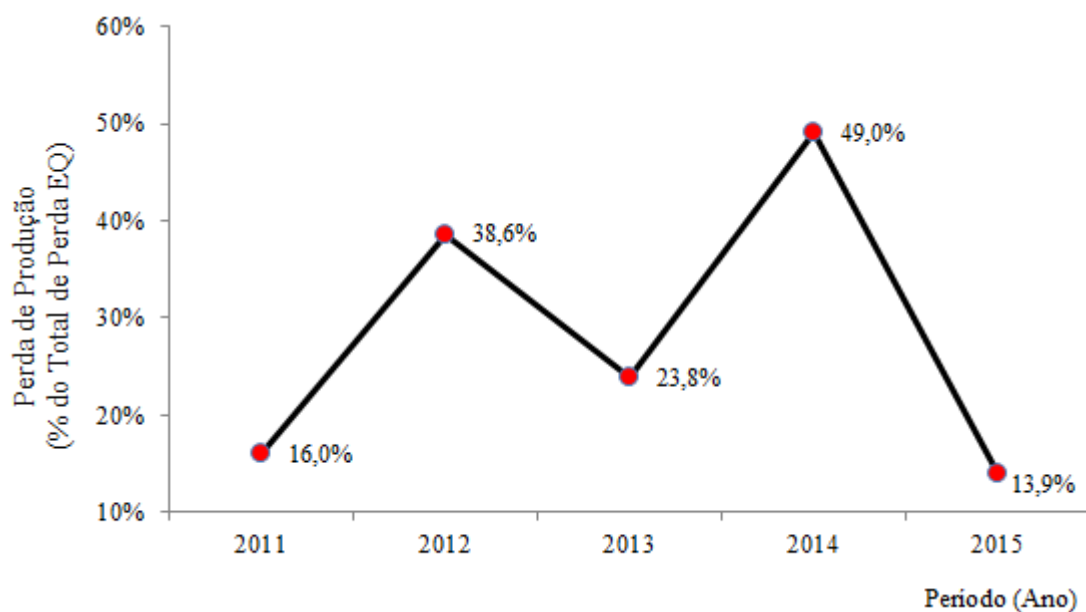


Figura 22 – Representação gráfica da perda de produção dos equipamentos rotativos.

Aplicando-se uma média aritmética nos valores de perda de produção mostrado na Figura 22, encontra-se uma média anual de 28,4 % do total de perdas ocasionadas por paradas não programadas de equipamentos (EQ). O número pode não ser tão significativo, entretanto em 2014 esses equipamentos foram responsáveis por quase 50 % do total de perdas referente aos equipamentos, ou seja, de fato eles têm um potencial muito grande de impactar negativamente na produção (lucro cessante).

Especificamente no ano de 2014, um dos compressores de CO₂, responsável por injetar o gás no misturador que antecede o reator de síntese, apresentou uma falha e ficou indisponível por 30 dias. Considerando as perdas por outros eventos, apenas esse compressor foi responsável por aproximadamente 66 % do total de perdas de todos os equipamentos rotativos nesse mesmo ano. Porém, é importante ressaltar que este fenômeno não corresponde à rotina. A Figura 23 apresenta o panorama geral da participação por classe de equipamento rotativo.

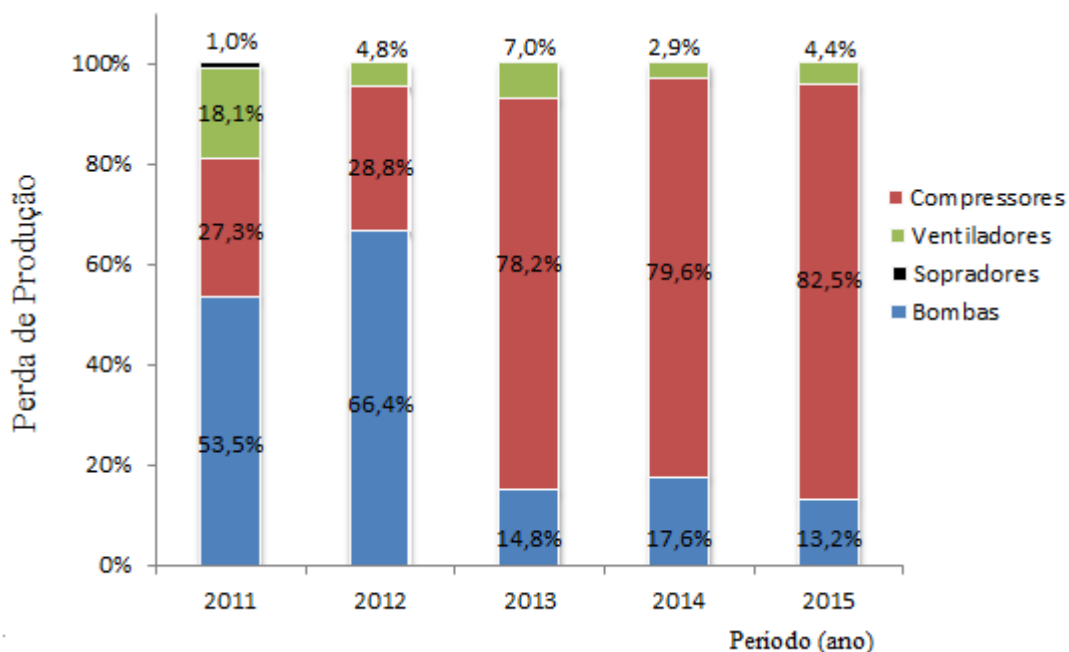


Figura 23 – Representação gráfica da perda de produção por classe de equipamento rotativo.

A Figura 23 sugere que, entre os equipamentos rotativos as bombas e compressores são os principais responsáveis pelas perdas. Isso se deve a dois principais motivos: a quantidade de bombas e compressores é superior à de ventiladores e sopradores e existem bombas e compressores que são equipamentos de processo de grande porte, isto é, quando apresentam alguma falha ou defeito, o impacto na produção é bem mais significativo que o de outros equipamentos rotativos. O nível de complexidade e as condições de operação mais severas (altas temperaturas, pressão e rotação) contribuem para o “surgimento” de falhas.

Observando a evolução da participação dos compressores na perda de produção e levando em consideração as condições operacionais e o nível de complexidade envolvido na operação, entende-se que os compressores se apresentam como equipamentos de elevada criticidade para a produção. Analisando os eventos na folha de dados da empresa, notou-se que o sistema de compressão de CO₂ é uma das principais fontes de perda. Portanto, para a continuidade desta pesquisa, as aplicações das ferramentas para análise de falha terão como objeto de estudo esse sistema. Mais especificamente, o compressor em análise será o alternativo de pistão horizontal movido a motor elétrico.

5.2 ETAPA 2: ANÁLISE DA TAREFA (CONTEXTO OPERACIONAL)

O posto de trabalho em estudo compreende o mesmo sistema sob o qual foi realizada a análise da confiabilidade de sistema e da confiabilidade humana – o sistema de compressão de

CO₂. Os aspectos considerados na análise da confiabilidade operacional foram: (1) cumprimento de procedimento; (2) nível de complexidade; (3) caracterização do sistema auxiliar; (4) nível da atenção desviada do sistema principal para os sistemas auxiliares; e (5) nível de linhas de reciclo do sistema em comparação com o sistema principal. Todos os itens foram analisados com base na perspectiva de operadores entrevistados.

5.2.1 Descrição do Posto de Trabalho

O ambiente de trabalho, principalmente o da indústria de processo contínuo, em que a operação é realizada pelo sincronismo homem-*software*-máquina, apresenta dois postos de trabalho bem distintos nos quais estão inseridos os trabalhadores: a sala de controle e o ambiente industrial propriamente dito – local onde são realizadas as operações do processo e onde estão distribuídos os equipamentos.

A sala de controle normalmente é composta por operadores de painel, operadores chefes e coordenadores de turno (cargo ocupado por operador ou por engenheiros). É nesse local de trabalho que são realizadas as supervisões de todo o processo produtivo e de onde partem as decisões para a realização de manobras em campo (por exemplo, testes, parada e partida). Nesse local também costumam ocorrer encontros de profissionais de áreas distintas (operação, manutenção e processo) para buscar a solução de problemas no campo.

No ambiente industrial ou no “chão de fábrica” estão presentes os operadores de campo (ou de área). Esses profissionais apresentam maior mobilidade que os operadores de painel e, por estarem em contato direto com os equipamentos e os processos, estão expostos a maiores riscos. De forma geral, eles são incumbidos de realizar as seguintes tarefas:

- Leitura da área (leitura de pressão, de temperatura, de vazão etc.) para o monitoramento e verificação com os valores exibidos no painel;
- Coleta de amostra (óleo, água etc.) e envio do material para o laboratório;
- Liberação da permissão de trabalho para manutenção e reparos;
- Realização de manobras na área (abrir/fechar válvulas, testes em equipamentos, auxiliar partida/parada de equipamentos ou de uma unidade/planta) por meio da comunicação direta com o operador de painel;
- Registro de informações em relatórios (eventos anormais e parâmetros de acompanhamento diário).

As plantas de processos contínuos são projetadas para operar ininterruptamente 24 horas por dia durante todo o ano. Para que isso ocorra, o trabalho é realizado em turno por equipes de trabalhadores que integram um quadro fixo de funcionários, que opera toda a unidade para a qual foram designados. A unidade objeto desse estudo apresenta equipes de sete pessoas, que cuidam de toda a operação da unidade e se revezam em três turnos: das 07 h às 15 h, das 15 h às 23 h e das 23 h às 07 h da manhã do dia seguinte. A equipe está dividida em dois operadores de painel, um supervisor e quatro operadores de campo.

As atividades dos operadores (de campo e de painel) são similares às aquelas apresentadas no parágrafo anterior, que são típicas de operadores da indústria petroquímica, conforme a Classificação Brasileira de Ocupações (CBO). Entretanto, algumas atividades específicas são exigidas de acordo com o processo, suas condições e equipamentos envolvidos. Portanto, para a análise da confiabilidade operacional, o sistema analisado segue o mesmo da confiabilidade de equipamentos, isto é, o sistema de compressão de CO₂. O tipo e o nível de intervenção humana (sensório-motora ou cognitiva, de comando), desempenhados pelos operadores, dependem do tipo de tarefa desenvolvida: operação normal, retirada dos compressores da operação e liberação dos compressores.

5.2.1.1 Operação normal

O sistema de compressão conta com a operação de quatro compressores, todos eles são quase 100 % automatizados. Compressores de processos de todas as classes e projetos devem ser monitorados de perto, porque tendem a ser máquinas de alta potência e alta energia. Em muitos casos, não há substitutos, o que os torna altamente críticos para a produção.

Como os compressores tendem a compor a lista das máquinas mais críticas na maioria das instalações industriais, faz sentido observá-los de perto e mantê-los disponíveis e operando de forma eficiente. Aqui estão algumas maneiras gerais de garantir que compressores funcionem com segurança e confiabilidade:

- Verificação dos vários níveis de óleo;
- Verificação de pressão e temperatura do gás CO₂ na entrada e saída de cada estágio;
- Verificação da temperatura da água de resfriamento;
- Verificação periódica das temperaturas das válvulas de sucção;
- Verificação da pressão diferencial do filtro de óleo lubrificante;
- Verificação periódica dos drenos do sistema de gás;

- Verificação de pontos de vazamento;
- Registro de todos os pontos do compressor (temperatura e pressão interestágios, qualidade do óleo etc.) que são indicados para tal;
- Informe e registro de anormalidades encontradas (vibração anormal, ruído anormal, sobreaquecimento etc.).

As atividades em campo que podem exigir maiores habilidades sensório-motoras no sistema de compressão em estudo são as manobras de controle de desempenho e abertura/fechamento do dreno do vaso separador. Em ambos os casos, os dispositivos são manuais, porém a frequência da realização da manobra é diferente. No primeiro caso, manobras de controle de desempenho e ajuste da vazão só ocorrem em situações excepcionais – problema na unidade ou qualquer outra situação que necessite redução/aumento da vazão. Já no caso do dreno do vaso separador, a observação e a intervenção do operador dependem da leitura da situação durante a verificação.

Embora atualmente tais sistemas não necessitem de força física dos operadores, por outro lado exigem extrema atenção aos detalhes da operação, tanto do sistema principal quanto dos sistemas auxiliares, para garantir a confiabilidade e manutenibilidade dos equipamentos. Problemas detectados mais cedo, tendem a ser solucionados mais rapidamente e seus efeitos minimizados. Por isso a importância das rotinas de acompanhamento em campo.

5.2.1.2 Partida/Parada do compressor

Diferentemente das atividades de rotina desempenhadas durante a operação normal, a partida/parada de equipamentos de processo, como é o caso dos compressores de CO₂ em estudo, geralmente envolve a participação de profissionais da operação, manutenção, elétrica e engenharia. Além disso, a depender do nível de interligação entre as unidades da planta, pode requerer a participação de pessoal de unidades diferentes.

As dimensões dos equipamentos de processo e suas condições de operação, que proporcionam elevado risco (elevados níveis de temperaturas e pressão, fluido tóxico ou inflamável), requerem uma atenção para evitar danos ao sistema e aos envolvidos na execução da tarefa. Fatores ergonômicos, nível de estresse e de atenção, seguimento de procedimento, comunicação eficaz, também são elementos importantes para assegurar que a tarefa de partida/parada seja completada.

O alto nível de automação e instrumentação facilita a operação na tarefa de partida/parada do equipamento e minimiza os riscos de falhas, porém, é imprescindível a presença do operador de área junto ao equipamento. Os operadores realizam simultaneamente a inspeção, o monitoramento e as manobras da partida/parada do equipamento com auxílio de documentos (*checklists*) que contêm um passo a passo da tarefa a ser realizada e uma lista de verificação para assegurar a execução de cada passo. O procedimento de partida do compressor possui aproximadamente 36 etapas, que devem ser seguidas pelo *staff*.

5.2.2 Aspectos de SMS

A instalação industrial tem quase cinquenta anos de operação, o que já demonstra um indicativo de que as unidades não foram projetadas tendo como premissas os aspectos de segurança e ergonomia. A instalação passou por um *revamp* que modernizou o processo com a chegada de novos equipamentos, mas que, por outro lado, causou mais congestionamento na área, aumentando o potencial de risco da mesma. O Quadro 2 apresenta os aspectos de SMS e potenciais riscos que podem colocar em risco a integridade física das pessoas.

Quadro 2 – Aspectos de SMS e potenciais riscos.

Tipo de Risco	Descrição
Circulação de pessoas	A ergonomia deficiente (com base em relatos dos operadores) da área e a necessidade de circulação de colaboradores durante as manobras operacionais em locais de circulação reduzida/restringida.
Ambiente confinado	Em caso de liberação para manutenção que precise do acesso de pessoas no interior de equipamentos classificados como ambiente confinado, eles devem ser tratados segundo os procedimentos específicos.
Riscos químicos	Devido à possibilidade de vazamentos nos próprios equipamentos, em flanges e acessórios, quando em circulação pela área operacional, os colaboradores estarão expostos à inalação de vapores orgânicos. Existe também o potencial de liberação de CO ₂ , fluidos de lubrificação e refrigeração provenientes de vazamentos dos equipamentos dinâmicos.
Tensão elétrica	A unidade industrial conta com equipamentos que apresentam alta tensão. Essa característica, que é função da complexidade e do porte do equipamento, requer cuidados especiais que devem ser tomados durante procedimentos de partida, parada e operação, evitando que sistemas sejam energizados inadvertidamente.
Incêndio e explosão	A síntese da ureia requer níveis elevados de pressão e temperaturas. As condições normais do processo alcançam uma pressão de 260 kg/cm ² e temperatura próxima dos 200°C. Portanto, os equipamentos (dinâmicos e estáticos) que estão sujeitos a tais condições representam grande risco, devido ao acúmulo de energia nos diversos vasos de pressão. No entanto, os equipamentos são protegidos com sistemas de segurança, oferecendo barreiras para evitar qualquer evento mais grave. Isso significa que um evento desse tipo geralmente ocorre devido a uma combinação de fatores.
Queimaduras	As temperaturas elevadas também oferecem risco de queimaduras devido ao contato com partes aquecidas, respingos de material líquido, vapor e condensado quente.

Tipo de Risco	Descrição
Ruído	A operação de equipamentos rotativos geralmente é intrinsecamente ruidosa, especialmente os compressores alternativos, devido às elevadas amplitudes de vibração com frequências audíveis. As cargas desbalanceadas, o aumento das folgas entre componentes devido ao desgaste excessivo, elevadas velocidades de escoamento do gás no interior das tubulações, elevada frequência de abertura e fechamento das válvulas são as principais causas de elevadas amplitudes de vibração e, conseqüentemente, de ruído.

5.2.3 Análise da Complexidade da Tarefa do Sistema de Compressão

5.2.3.1 Cumprimento de procedimentos operacionais padrão

No estudo de caso em análise, verificou-se que no sistema de compressão de CO₂ existem alguns procedimentos específicos para diferentes situações, alguns realizados com frequência e outros não. Os procedimentos específicos são: partida, parada de emergência, liberação para parada geral e parada/liberação de um ou outro compressor quando um deles está em operação.

Os operadores entrevistados afirmam que a empresa apresenta uma forte política de segurança, o que implica na revisão anual dos procedimentos e conta com a participação de operadores com experiência para sua concordância. Os operadores são treinados e orientados a seguir os procedimentos, quando existentes, e a utilizar *checklist* para assegurar o cumprimento de cada etapa da tarefa.

Não existe, no entanto, procedimentos quando os compressores estão em operação normal. Nesse caso, existem verificações específicas a serem realizadas, nas quais algumas delas são registradas no livro de turno. Essa verificação conta com a experiência do operador em detectar problemas na máquina. Cabe ressaltar que também existe o monitoramento dos compressores via sala de controle. Observando a importância dos compressores para a produção e ao grande potencial de perda resultante de um eventual sinistro, sugere-se implantar um procedimento específico para o diagnóstico de anormalidades com base nos históricos de falhas e de informações do fabricante. Tais procedimentos devem ser centrados na leitura dos sinais de falhas, o que requer uma maior aproximação da operação e manutenção. Isto remete à ideia da formação do operador mantenedor.

5.2.3.2 Automação do sistema

A planta de modo geral é classificada como um processo de alto risco e complexidade. Essa instalação industrial apresenta as seguintes características: alto grau de automação

(sistemas principais e auxiliares) e de interligação entre unidades; equipamentos de processos de grande porte; condições de operação (temperatura e pressão) elevadas – em alguns pontos do site, por exemplo, a pressão alcança níveis de 260 kg.cm^{-2} .

A empresa tem histórico de sinistro ocorrido em um equipamento rotativo com característica semelhante à do objeto de estudo deste trabalho. Desde então, vários investimentos foram feitos para automação e instrumentação de sistemas críticos nos quais manobras eram realizadas por operadores em campo. Com a automação, ações em campo foram substituídas por monitoramento via sala de controle e rotinas de acompanhamento na área.

A criticidade do equipamento para o processo/produção e para a segurança eleva a um mesmo patamar a necessidade de acompanhamento dos parâmetros dos sistemas principal e auxiliar. No caso dos compressores, os sistemas de lubrificação e de refrigeração devem ser monitorados com certa frequência para garantir o cumprimento da função principal.

5.2.3.3 *Caracterização dos sistemas auxiliares*

Para o sistema de compressão em estudo, os sistemas auxiliares considerados foram a lubrificação, a refrigeração, os amortecedores de pulsação e o sistema de proteção (alarme e *trip*).

a) Sistema de lubrificação

O sistema de lubrificação do compressor alternativo de CO_2 é dado em duas etapas principais: a lubrificação de cilindros e caixa de gaxetas e a lubrificação dos mancais do eixo de manivelas, que também vão lubrificar as guias de cruzetas. As funções principais desse sistema são o resfriamento das peças, a contribuição com a selagem do gás e a diminuição do atrito e do arraste das impurezas metálicas prejudiciais à máquina.

Esse sistema é composto por óleo lubrificante de qualidade recomendada para o serviço; sistema de refrigeração do óleo lubrificante – que utiliza a água como fluido de refrigeração (AGR); filtro duplo; sistema de controle da temperatura e pressão – por meio da atuação do termostato e do pressostato; alarmes; regulador de pressão e bomba auxiliar. O monitoramento do sistema de lubrificação do compressor em estudo apresenta os seguintes pontos de acompanhamento:

- Verificação visual do nível do óleo;
- Verificação do dreno do sistema de refrigeração;

- Temperatura de entrada/saída do fluido de refrigeração;
- Verificação das condições do filtro de óleo para troca;
- Verificação da qualidade do óleo para troca;
- Indicador de pressão diferencial.

b) Sistema de refrigeração

O Sistema de resfriamento pode ser dividido em resfriamento dos trocadores interestágios, resfriamento do sistema de compressão (camisas e caixas de gaxetas), resfriamento do motor e resfriamento de óleo. Contudo, o sistema de refrigeração tratado nesta seção refere-se ao sistema dos trocadores interestágios.

O compressor alternativo de CO₂ apresenta quatro estágios. Como a pressão é diretamente proporcional à temperatura, após cada estágio de compressão do CO₂ a temperatura também aumenta; portanto, é necessário resfriar o CO₂ para seguir nos próximos estágios de compressão até atingir a pressão desejada. Os *intercoolers* do sistema de resfriamento interestágios são resfriados com AGR proveniente do sistema geral. Como o CO₂ é um gás saturado, há formação de condensado nesse processo, devendo o mesmo ser recolhido nos vasos separadores de onde serão descartados por meio dos drenos. Nesse sistema, o acompanhamento é realizado pelo monitoramento das seguintes variáveis:

- Pressão diferencial;
- Variações na temperatura/pressão da AGR;
- Vazão entrada/saída;
- Nível do condensado.

c) Amortecedores de pulsação

Os amortecedores de pulsação são instalados bem próximos ao compressor (na sucção e na descarga de cada estágio) e têm como objetivo amortecer as flutuações da pressão dentro da tubulação para evitar a propagação de vibração através dela. Nesse sistema existe o acompanhamento de vibrações e ruídos para detecção de anormalidades.

d) Sistema de proteção

Os compressores alternativos de CO₂ são equipamentos que operam em condições severas, exigindo um sistema de proteção adequado para garantir a segurança e a integridade dos mesmos. As principais variáveis monitoradas são: pressão do óleo, temperatura dos

mancais, pressão da sucção, vazão da AGR e temperaturas do CO₂ em cada estágio. Um sistema de alarme é acionado quando ocorrer uma das seguintes condições:

- Pressão baixa na sucção;
- Pressão baixa de óleo de lubrificação;
- Temperatura alta do óleo de lubrificação;
- Temperatura baixa de CO₂ na sucção;
- Temperatura alta de CO₂ na descarga;
- Temperatura alta de óleo nos mancais;
- Alta pressão de CO₂ na descarga.

Observa-se que quase metade dos alarmes e das principais variáveis monitoradas faz referência aos sistemas auxiliares, principalmente o sistema de lubrificação e AGR. Esse cenário corrobora com a afirmação da importância desses sistemas em equipamentos rotativos críticos. Além disso, quando algumas dessas variáveis ultrapassam os limites de segurança, o sistema de proteção é ativado e o equipamento é retirado da operação automaticamente. Esse evento é conhecido como *trip* do equipamento. Exemplos de situações em que esse fenômeno pode ocorrer é a pressão muito baixa na sucção, a pressão muito baixa no óleo, a temperatura muito alta no mancal e a pressão muito alta na descarga.

5.2.3.4 *Nível de atenção desviada – sistema principal vs. sistema auxiliar*

Os operadores (de painel e de campo) monitoram e operam todos os sistemas da unidade da qual fazem parte. Isso significa que não existe uma equipe exclusiva ou um operador exclusivo de determinado sistema; por exemplo, um operador que acompanhe apenas determinado compressor. A unidade de estudo é complexa e inúmeras atividades são desenvolvidas para garantir a operação de toda unidade/planta.

No caso de comparar em termos de quantidade as variáveis dos sistemas auxiliares e do sistema principal (do sistema de compressão) que são monitoradas, observa-se que há um “desvio” alto da atenção do sistema principal para o sistema secundário. Caso fosse possível atribuir um valor que relacionasse a quantidade de tarefas principais e secundárias a cada dez tarefas a serem realizadas, sete seriam de caráter de atenção em relação a sistemas secundários.

Nem todas as informações estão presentes no painel da sala de controle, assim, em alguns casos é necessário o uso de instrumentos para realizar a leitura da informação desejada.

A automação, a instrumentação e um bom projeto dos sistemas em campo (fatores ergonômicos, localização mais adequada dos sistemas auxiliares etc.) e da sala de controle (interface das telas do sistema de controle, gerenciamento de alarmes etc.) podem auxiliar na minimização de tais problemas.

Contudo, essa divisão entre os sistemas (principal e secundários) não acontece na prática da rotina da operação do compressor. O operador entende que não se trata de um desvio de atenção, já que todos os subsistemas que fazem parte do sistema de compressão são vistos com igual importância para manter a eficiência do equipamento.

5.2.3.5 Nível de linhas de reciclo

A planta como um todo apresenta uma alta interligação entre unidades e sistemas para atender às demandas que são inerentes ao processo. No entanto, o sistema de compressão não apresenta um alto nível de linhas de reciclo. O ponto de reciclo mais importante do fluxo do CO₂ no processo de compressão é utilizado para o controle da capacidade do equipamento.

5.2.4 Considerações Finais

O sistema de compressão de CO₂ é de extrema importância para a organização, pois qualquer evento indesejado que ocasione a indisponibilidade de um dos quatro compressores (ver Figura 18) tem o potencial para impactar de forma significativa a perda por não produção. Portanto, os operadores são responsáveis por realizar as manobras necessárias para o processo e as atividades de monitoramento e de verificação para a identificação de desvios da normalidade para, assim, poderem realizar as intervenções necessárias o quanto antes.

A alta relevância dos compressores devido às condições severas de operação exige um alto grau de automação e instrumentação dos sistemas principal e secundários. Esse ambiente favorece a operação na realização das manobras e identificação de anormalidades. No entanto, verificou-se que o conjunto dos sistemas auxiliares apresenta uma quantidade superior de variáveis monitoradas quando comparado ao sistema principal. Isso se deve ao fato de que o sistema principal é apoiado por basicamente quatro outros subsistemas que são responsáveis por garantir o bom funcionamento do compressor.

Cada um desses subsistemas (lubrificação, refrigeração, amortecimento de pulsação e proteção) contém variáveis críticas a serem monitoradas, embora nem todas estejam disponíveis na tela da sala de controle, o que implica na necessidade da rotina de

acompanhamento em campo. Nem mesmo o sistema principal opera com todas as informações que são necessárias na tela da sala de controle.

Com a aplicação dessa metodologia foi possível indicar alguns elementos-chave que têm o potencial de influenciar contexto operacional do sistema de compressão, quais sejam:

- Número de variáveis monitoradas (principal vs. secundária) em campo e na sala de controle para análise do desvio de atenção entre sistema auxiliar e principal – neste caso ainda sugere-se aplicação de técnicas multivariadas, como a análise de componentes principais para definição do número de variáveis a serem monitoradas simultaneamente;
- Necessidade de rotina de acompanhamento em campo para assegurar que os valores mostrados na tela correspondem àqueles mostrados em campo;
- Necessidade de instrumentação – apesar do alto grau de automação do sistema principal, no sistema secundário ainda possuem algumas variáveis que são lidas apenas em campo (não disponíveis na sala de controle);
- Qualidade dos procedimentos operacionais, bem como o seus percentuais de seguimento – necessidade de maior envolvimento dos operadores na revisão dos procedimentos e elaboração de procedimentos específicos para diagnósticos de anormalidades.

O estudo também indicou que em condições normais de operação não há muita intervenção humana no sistema de compressão de CO₂. Devido ao nível de automação desse sistema, uma vez que os equipamentos estejam operando, as atividades desempenhadas pelos operadores são de acompanhamento e de diagnóstico via sala de controle ou em campo. Portanto, em operação normal, o risco praticamente é por conta do processo. Uma atividade que exige mais atenção e cuidado dos operadores está na partida e parada do equipamento. Essa tarefa, nesse caso, é entendida como crítica pelas condições de operação, principalmente pela alta pressão (~260 kg/cm²), e pela quantidade maior de atividades sensório-motoras, isto é, atividades que requerem manobras de ação humana, não apenas tarefas de diagnóstico/acompanhamento.

Vale a pena ainda realizar duas ressalvas importantes que afetam a confiabilidade operacional. A primeira delas é que o sistema de compressão é apenas uma parte do processo, ou seja, existem muitas outras variáveis que são monitoradas simultaneamente. O outro ponto a considerar diz respeito à diminuição do efetivo operacional. Com relação a essa última

consideração, não importando qual o motivo, ainda não há um consenso quanto aos riscos envolvidos nesse processo.

Um dos pontos em discussão é que a automação, que engloba o controle avançado de processos, pode ser capaz de reduzir a sensibilidade de detecção de anormalidades por interferir nas rotinas de acompanhamento em campo. Em um cenário onde tudo está interligado e automatizado, espera-se que não haja tanta necessidade de operadores na área industrial. A falta de vivência no “chão de fábrica” afeta a construção do conhecimento adquirido pela experiência em campo. Conseqüentemente, outras atividades, que de alguma forma dependam de uma maior participação do homem (partida e parada de sistemas, por exemplo), poderão ser comprometidas.

5.3 ETAPA 3: ANÁLISE DE FALHAS EM SISTEMA TÉCNICO

A análise de falhas do sistema técnico discutida nesta seção tem como objetivo a identificação de elementos que, individualmente ou em conjunto, ocasionam (ou têm o potencial de ocasionar) a parada do compressor alternativo de CO₂ e/ou afetam o seu desempenho. A análise de confiabilidade foi utilizada para modelar o comportamento de falhas do compressor em função do tempo. Dessa forma, foi possível obter a função taxa de falha e conhecer os principais indicadores de desempenho do compressor.

A gerência da unidade onde foi aplicado este trabalho não tinha disponível os indicadores utilizados para realizar as análises de confiabilidade – tempo entre falhas, tempos entre reparos etc. Uma vez que esses dados não estão disponíveis nem mesmo para uso próprio da organização, a coleta desses dados para todo o sistema de compressão do CO₂ implicaria em uma demanda muito grande da empresa em disponibilizar funcionários para auxiliar nessa quantificação. Devido a essa dificuldade, o estudo da confiabilidade teve como objeto de estudo um único compressor, nesse caso o C-02 (Figura 18). A escolha do compressor levou em consideração o impacto na perda de processo – como discutido na seção do mapeamento de perda, este compressor foi o maior responsável pela perda no ano mais crítico entre o período de 2011 a 2015, o ano de 2014.

5.3.1 Diagrama de Ishikawa

A construção do diagrama de Ishikawa levou em consideração no máximo dois níveis das causas potenciais em uma tentativa de abordar fatores técnico, humano e organizacional.

Com o objetivo de melhorar a visualização gráfica os resultados foram apresentados em dois diagramas, ambos estão apresentados nos Apêndices B e C. A análise contou com a participação de engenheiros da unidade e foi complementada com dados da literatura.

Os principais fatores presentes no diagrama de Ishikawa que diretamente ocasionam a parada imediata (de emergência) ou provocam uma manutenção corretiva são: o ruído e vibração anormal, vazamentos de CO₂, sobreaquecimento na descarga e o desgaste de componentes. Essas falhas costumam ser inerentes ao equipamento (movimento de componentes internos) e potencializadas com as condições da operação.

Compressores alternativos representam um conjunto de diversos componentes mecânicos, sendo que muitos deles estão em movimento relativo durante sua operação e, considerando que as condições de operação geralmente são severas, espera-se, portanto, a ocorrência de desgastes e fontes de perda de eficiência. Por outro lado, quando adequadamente projetados, instalados e operados, os compressores conseguem desempenhar satisfatoriamente suas funções e as falhas são mais fáceis de serem controladas e previstas.

Deficiências no projeto geralmente configuram-se como elementos potenciais na geração de falhas prematuras. No equipamento em estudo, verificou-se que a presença de condensado devido ao subdimensionamento dos vasos separadores é vista como uma das principais fontes de falha. A presença de líquido pode ocasionar o desgaste de componentes internos (pistões, selos, válvulas etc.) por corrosão, comprometer a qualidade do sistema de refrigeração (degradação da qualidade do óleo lubrificante e maior demanda de troca térmica da água de refrigeração), causar golpes de aríetes nas tubulações e vibração excessiva do compressor. Por outro lado, o resfriamento excessivo (sub-resfriamento) dos cilindros também pode causar condensação e incorrer nos problemas citados.

Outras questões de projeto que devem ser consideradas têm relação com as temperaturas de sucção, que se encontram por volta de 50 °C, e o método de controle de capacidade. O Instituto Americano de Petróleo recomenda em sua norma API 618 que a temperatura de sucção não ultrapasse o valor máximo de 45 °C. Quanto maior for a temperatura do gás na admissão, maior será sua temperatura na descarga, reduzindo a eficiência da lubrificação e, conseqüentemente, reduzindo a vida útil das vedações. Adicionalmente, altas temperaturas também podem implicar na redução da vazão e aumento do consumo de energia.

Já o método de controle de capacidade (*bypass*) é considerado como um dos menos eficientes entre os existentes. A depender do percentual de gás recirculado e da frequência

com a qual o método é realizado, os componentes da câmara do cilindro, do pistão e das válvulas de sucção poderão sofrer com o aumento da temperatura, uma vez que o gás recirculado está a uma temperatura maior do que a sucção em operação normal.

Como discutido em capítulos anteriores, a operação de equipamentos alternativos é intrinsecamente ruidosa devido às elevadas amplitudes de vibração, ou seja, praticamente existe uma relação entre causa e efeito entre ambos. Por esse motivo, devem os operadores ter ouvidos afinados para o som habitual para reconhecer as mudanças na operação. Existem vários elementos que podem causar ruído e vibração anormal, os principais são:

- Cargas desbalanceadas;
- Folga entre componentes devido ao desgaste excessivo;
- Elevada frequência de fechamento e abertura de válvulas de admissão e de descarga,
- Válvulas defeituosas;
- Presença de contaminantes no gás (líquido e resíduos metálicos), o que provoca batida de intensidade variada;
- Parafusos e suportes frouxos.

Os níveis de vibração e de ruído podem ser minimizados por meio de planos de manutenção eficientes que considerem uma rotina de acompanhamento para o monitoramento dessas variáveis.

Os compressores mais modernos, além de serem altamente automatizados, utilizam as mais variadas técnicas para predição de falhas, como, por exemplo, o acompanhamento de vibração, de ruído e de variáveis como a pressão e a temperatura de admissão/descarga em cada estágio. Quando esses parâmetros não têm um monitoramento apropriado, seja por falta de instrumentação (leitura de temperatura apenas em campo) ou por falta de rotinas de acompanhamento adequadas, o diagnóstico precoce de falhas torna-se impraticável.

Não se pode atribuir à questão do monitoramento de variáveis críticas como uma causa de falha do compressor ou com a perda de sua eficiência, porém essa atividade é requisito fundamental para o correto diagnóstico e para o direcionamento de onde e como os mantenedores devem atuar. Por outro lado, sabe-se que um diagnóstico incorreto da falha implicará em um plano de manutenção deficiente, que, além de ter o potencial de não resolver o problema, terá o risco de inserir modos de falhas durante a manutenção.

A organização ainda não dispõe de uma estrutura voltada para a gestão de falhas. Os registros não estão apresentados de forma adequada que possibilite um planejamento

estratégico da manutenção. A confiabilidade tem sido uma forte aliada nesta área, mas que necessita de alguns elementos básicos como, por exemplo, o adequado registro dos eventos (falhas, anormalidade que precedem as falhas, etc.) e das intervenções (histórico de manutenção preventiva, corretiva, preditiva); o acompanhamento de parâmetros como o tempo entre falhas (TEF) e o tempo entre reparos (TER); e o pessoal capacitado para aplicar a técnica. A falta de gerenciamento dessas informações dificulta o estabelecimento de um plano de manutenção mais efetivo e com menor custo.

A idade do equipamento é outro fator importante e por isso também é destacada neste estudo. Praticamente são quase 50 anos de operação. No decorrer desse tempo, devido às demandas por equipamentos cada vez mais seguros e resistentes, avanços tecnológicos foram conquistados e resultaram na indisponibilidade de algumas peças no mercado. Em decorrência disso, inevitavelmente existe a necessidade de adaptação de alguns componentes. Nesse caso, espera-se que esses componentes não ofereçam as mesmas qualidades quando em uso no seu estado original.

Por fim, destaca-se a influência das paradas do compressor como um elemento potencial para afetar o desempenho do equipamento. Na fase preliminar deste trabalho, foi discutido que uma das maiores fontes de perda da produção é a interferência de outras unidades – no caso do sistema de compressão tem-se a falta de matéria-prima (CO₂). Considerando todos os cenários de parada do equipamento (manutenção corretiva, manutenção preventiva, corte na alimentação do CO₂, corte no fornecimento de energia elétrica e outros), entre 2011 e 2015 houve em média 15 eventos anuais que o colocou fora de operação. Desse cenário é possível evidenciar alguns principais pontos: (1) baixa eficiência da lubrificação durante o período de partida e parada, (2) maior sacrifício dos acoplamentos e (3) cenário mais favorável ao erro humano.

A operação do compressor alternativo gera grande quantidade de calor devido ao efeito termodinâmico da compressão do gás e do atrito entre seus componentes. Na condição de repouso do equipamento existe um contato direto da superfície do eixo com a superfície inferior do mancal; conseqüentemente, o óleo lubrificante não consegue penetrar entre ambos, ocasionando o contato direto metal-metal. À medida que o eixo começa a girar, o lubrificante começa a ser bombeado e uma película irá se formar para afastar as duas superfícies sólidas. Nesse momento tem-se a lubrificação perfeita. Portanto, quanto mais eventos de parada no compressor, maiores são os riscos de desgaste por lubrificação insuficiente.

Outro componente que é afetado com os procedimentos de partida e parada são os acoplamentos. O torque necessário para vencer a inércia do compressor (mudança de estado de operante para não operante e vice-versa) é suficientemente elevado para produzir uma sobrecarga no acoplamento.

Uma vez que o equipamento é operado quase 100 % via sala de controle, as intervenções humanas são resumidas à tarefa de diagnóstico; praticamente apenas nos casos de partida e parada é que são realizadas também manobras manuais. Portanto, considerando o risco dessa atividade e que existe uma maior intervenção humana, entende-se que este é um cenário mais propício ao erro humano.

Outras atividades que estão mais relacionadas ao homem e que contribuem para a perda de produção são o diagnóstico da falha e a qualidade das intervenções da manutenção. Um diagnóstico incorreto e/ou um reparo deficiente resultará inevitavelmente no aumento da indisponibilidade do equipamento. Quando isso ocorre após um reparo, pode acontecer de o equipamento apresentar a mesma falha (ou falhar ao partir) logo após sua partida, ou até mesmo algum tempo depois. Em ambos os casos, o equipamento retorna para a manutenção resultando no aumento da sua indisponibilidade.

O Quadro D. 1 (Apêndice D) apresenta a relação de causa e efeito dos principais elementos que afetam o compressor em função de mudanças nas variáveis em análise. Nesse quadro constam apenas falhas relacionadas com aspectos físicos, pois intervenções humanas na operação são majoritariamente realizadas via sala de controle – atividades de supervisão.

5.3.2 Análise da Confiabilidade

Para avaliar o comportamento do compressor frente às falhas empregou-se a análise paramétrica e o método de exame de partículas (PSO) para estimação dos parâmetros do modelo. O período de análise vai de janeiro de 2011 até dezembro de 2015. Os tempos entre falhas (TEF) são mostrados na Tabela 2. Para a estimação da confiabilidade utilizou-se o Kaplan-Meier.

Tabela 2 – Tempos entre falhas do compressor alternativo C-02.

Falha	TEF (h)	Falha	TEF (h)
1	1111	10	1138
2	7023	11	1621
3	1530	12	2509
4	1087	13	541
5	318	14	290
6	498	15	2071
7	5982	16	495
8	4919	17	2068
9	416	18	1398

A escolha dos modelos levou em consideração a idade do equipamento (mais de 50 anos de operação) e os modos de falhas aos quais está sujeito (identificados na análise de Ishikawa). Assim, como identificado no diagrama de causa e efeito, os modos de falhas apresentados estão relacionados em sua maioria à condição de desgaste, principalmente pelo efeito da presença de condensado.

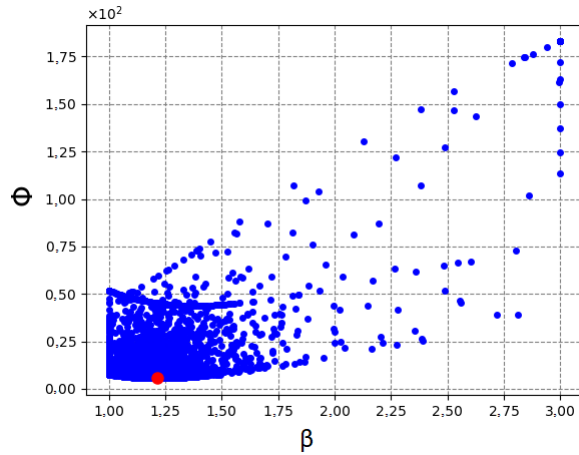
Assumindo tais características, era esperado que o equipamento apresentasse um comportamento crescente da função taxa de risco. Logo, os modelos que podem descrever tais comportamentos são a distribuição Weibull, a normal e a lognormal. A vantagem de utilizar a distribuição Weibull é que ela pode descrever os três comportamentos da taxa de falha, isto é, crescente, constante ou decrescente. No caso da distribuição normal descreve o comportamento crescente da taxa de falha. Já a distribuição lognormal apresenta um comportamento crescente taxa de falha até um máximo e, após esse ponto, decresce ao longo do tempo. Portanto, a distribuição Weibull e a normal foram os modelos pré-selecionados para a estimação dos parâmetros e modelagem da taxa de falha já que são os modelos que descrevem um comportamento crescente da função de risco.

Os resultados finais da estimação dos parâmetros, bem como os respectivos valores da variância e da incerteza da variável observada, que foi propagada dos dados medidos para os parâmetros, estão apresentados na Tabela 3. A solução do problema de estimação de parâmetros foi auxiliada pela representação gráfica da função objetivo para encontrar a região do ponto ótimo. As representações gráficas para cada modelo estão apresentadas na Figura 24 e na Figura 25.

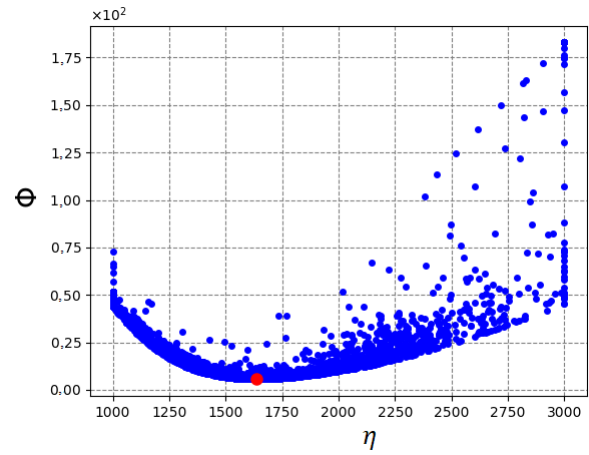
Tabela 3 – Valores dos parâmetros estimados e as variâncias e incertezas de cada modelo.

Variável	Weibull		Normal	
	β	η	μ	σ
Estimativa	1,214	1637	1319	944,3
Variância	0,04011	27970	8077	14970
Incerteza	0,2003	167,2	89,87	122,3

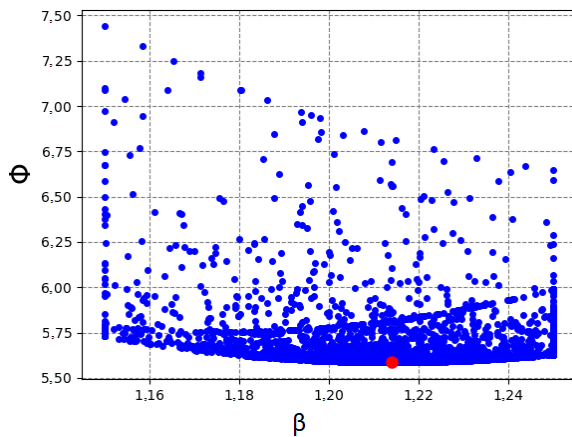
A análise gráfica da função objetivo se mostrou uma ferramenta importante para delimitar a região de busca do ponto ótimo, reduzindo os limites de busca dos parâmetros e oferecendo maior robustez aos resultados da estimação. Análises estatísticas também foram utilizadas para verificar a qualidade do ajuste e a qualidade dos parâmetros obtidos.



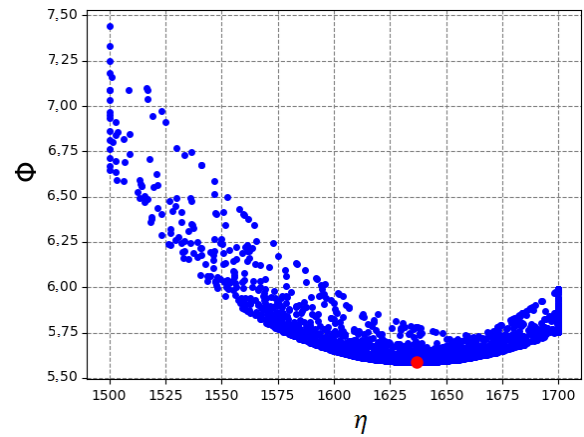
(a) Região de busca do mínimo da função objetivo (1ª estimativa) – parâmetro β .



(b) Região de busca do mínimo da função objetivo (1ª estimativa) – parâmetro η .

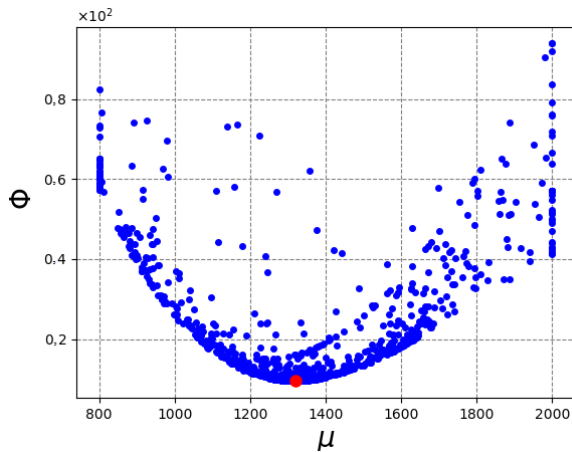


(c) Região de busca do mínimo da função objetivo (2ª estimativa) – parâmetro β .

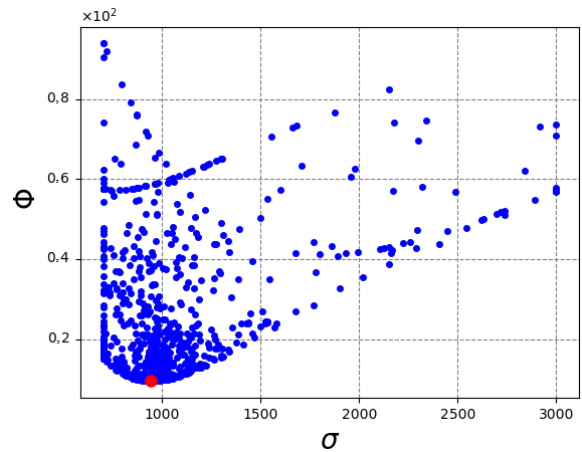


(d) Região de busca do mínimo da função objetivo (2ª estimativa) – parâmetro η .

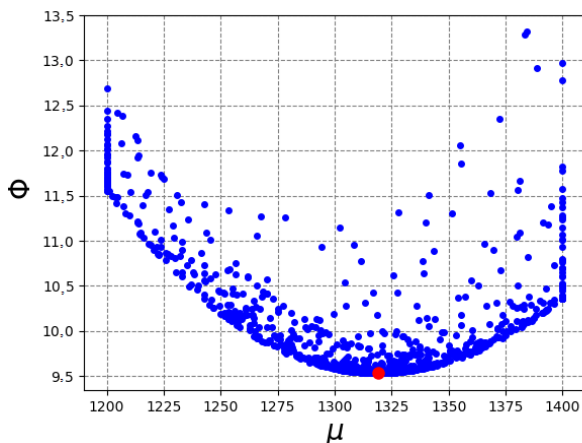
Figura 24 – Região de busca da função objetivo da distribuição Weibull.



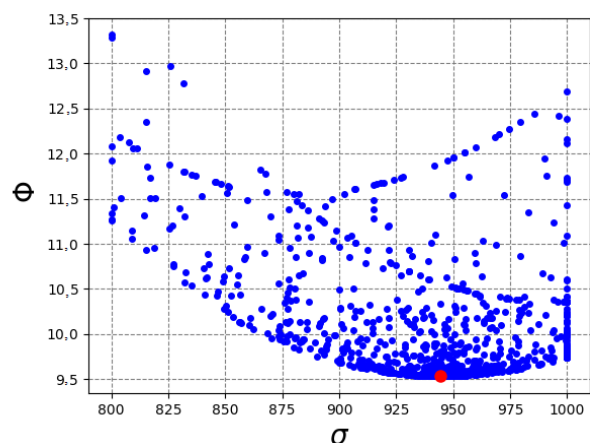
(a) Região de busca do mínimo da função objetivo (1ª estimativa) – parâmetro μ .



(b) Região de busca do mínimo da função objetivo (1ª estimativa) – parâmetro σ .



(d) Região de busca do mínimo da função objetivo (2ª estimativa) – parâmetro μ .



(c) Região de busca do mínimo da função objetivo (2ª estimativa) – parâmetro σ .

Figura 25 – Região de busca da função objetivo da distribuição normal.

Com relação ao teste χ^2 , o modelo consegue representar de forma satisfatória os dados experimentais quando o valor da função objetivo se encontra entre os valores mínimos e máximos de χ^2 , isto é, $\chi_{max}^2 < F_{Obj} < \chi_{min}^2$. Uma complementação da análise da qualidade do ajuste do modelo é também realizada por meio da análise do coeficiente de determinação – valores do coeficiente acima de 0,90 indicam bom ajuste. A Tabela 4 apresenta os valores limites do teste χ^2 , assim como o valor da função objetivo no ponto ótimo.

Tabela 4 – Resultados do teste χ^2 e do coeficiente de determinação.

Variável	Weibull	Normal
χ^2_{max}	28,845	28,845
Função objetivo	5,586	9,531
χ^2_{min}	6,908	6,908
Coeficiente de determinação	0,974	0,956

Os dois modelos apresentaram coeficiente de correlação superior a 0,90, o que é considerado satisfatório. Entretanto, apenas a distribuição normal apresentou o valor da função objetivo entre os limites superior e inferior. O valor da função objetivo da distribuição Weibull foi menor que o limite inferior, ou seja, $F_{Obj} < \chi^2_{Max}$. Segundo a literatura (SCHWAAB; PINTO, 2007), quando isso ocorre significa que o modelo reproduz os dados experimentais muito melhor do que o esperado. Neste caso, existem duas explicações: (1) o modelo pode estar superparametrizado e, portanto, pode ser simplificado (reduzido o número de parâmetros); ou (2) os erros experimentais estão superestimados.

A análise dos resíduos está relacionada com o significado estatístico da função objetivo WLS. No desenvolvimento dessa função objetivo, assume-se que os resíduos da regressão possuem média zero, variância constante e distribuição normal (SANTANA, 2014). Os testes realizados para este fim estão nos Anexos E e F. Como mostrado, apenas a distribuição normal apresentou um resultado negativo para o teste de autocorrelação, isto é, nos dois testes realizados (Box-pierce e χ^2), o p-valor foi inferior ao nível de significância de 0,05, o que sugere a rejeição da hipótese nula (resíduos não são autocorrelacionados).

A qualidade dos parâmetros obtidos pode ser avaliada por meio da matriz variância-covariância, ou da matriz de correlação. A matriz de correlação apresenta maior facilidade na interpretação dos dados. A Tabela 5 apresenta a matriz de covariância-variância e a matriz de correlação.

Tabela 5 – Matriz de covariância e de correlação para a distribuição Weibull e normal.

Distribuição	Matriz de Covariância	Matriz de Correlação
Weibull	$\begin{pmatrix} 0,0401 & -20,9388 \\ -20,9388 & 27965,1859 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & -0,625 \\ -0,625 & 1 \end{pmatrix}$
Normal	$\begin{pmatrix} 8076,567 & 5373,0812 \\ 5373,0812 & 14965,902 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0,489 \\ 0,489 & 1 \end{pmatrix}$

Schwaab e Pinto (2007, p. 294) afirmam que “quanto mais próximo de zero estiverem os coeficientes de correlação, mais eficientes serão os procedimentos de estimação e mais precisa será a identificação dos diferentes efeitos no modelo”. Na Tabela 5, observa-se que os

parâmetros da distribuição normal apresentaram uma menor correlação entre si em comparação com o resultado da distribuição Weibull. Essa correlação também pode ser verificada graficamente por meio da região de abrangência mostrada pela Figura 26.

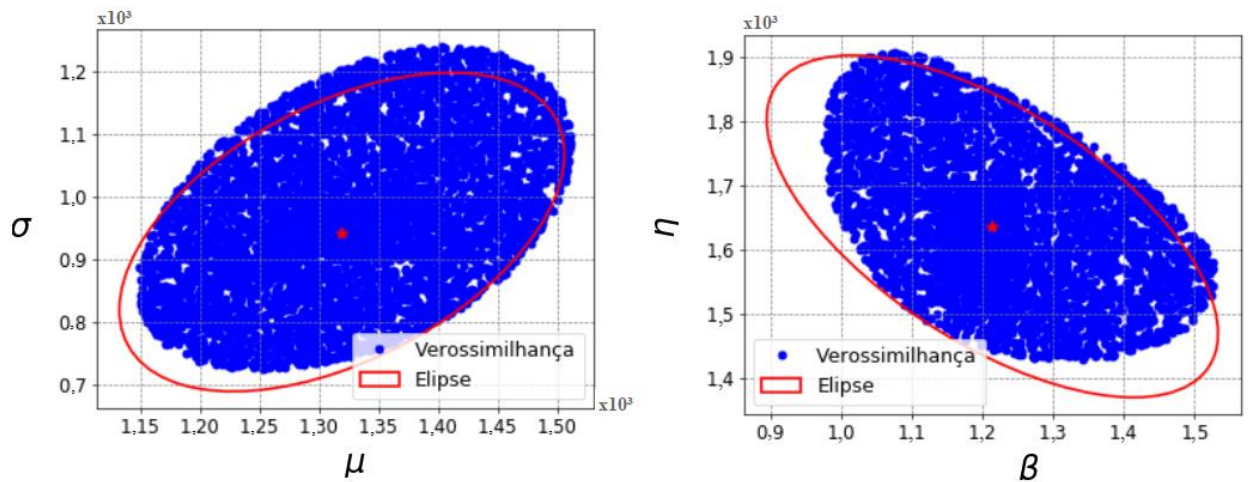
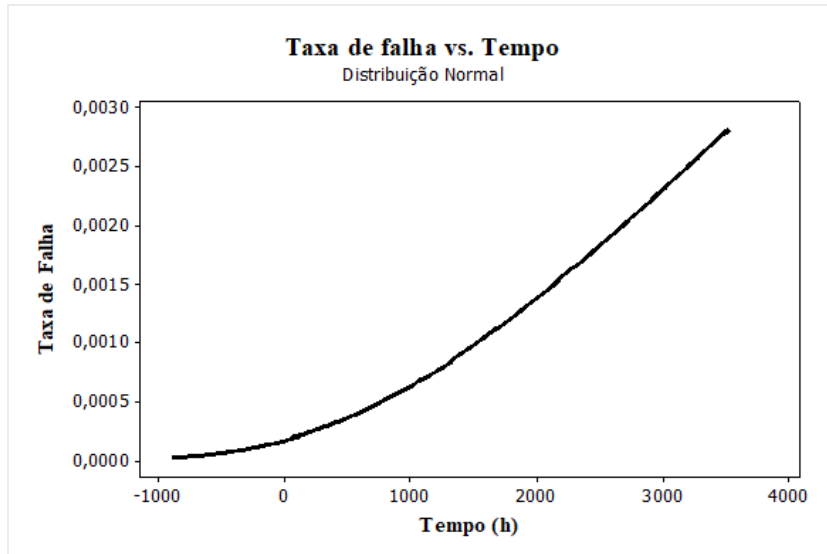
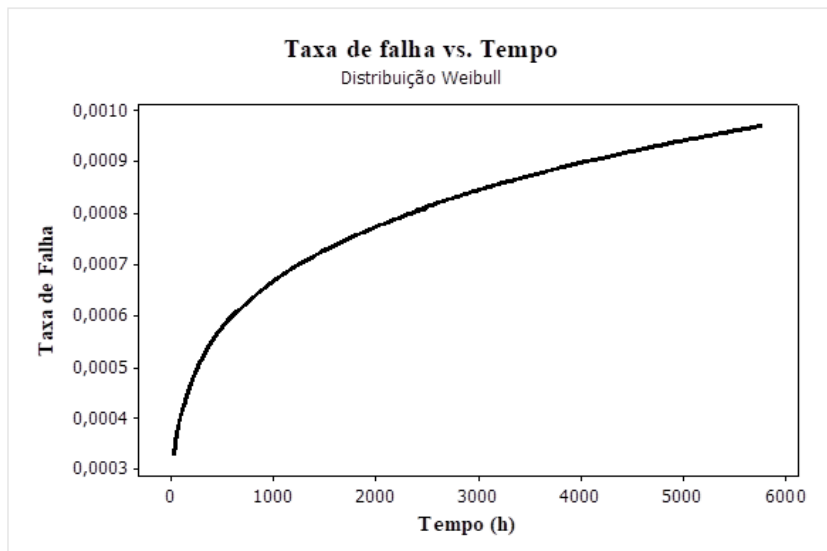


Figura 26 – Região de Abrangência dos modelos Weibull e normal.

Considerando todas as análises realizadas nessa seção, foi possível perceber que a distribuição normal foi a que apresentou resultados mais satisfatórios na estimação dos parâmetros do modelo. As características que melhor favorecem esse modelo quando comparado com o Weibull são: valor da função objetivo entre os limites mínimo e máximo, coeficiente de determinação superior a 0,90, correlação dos parâmetros relativamente baixa e a análise dos resíduos indicando média zero, variância constante, e uma distribuição normal. Esses resultados também sugerem uma boa qualidade do ajuste do modelo. Realizada a análise da qualidade do ajuste obtido e dos parâmetros, a construção da função taxa de falha está mostrada na Figura 27.



(a) Função taxa de falha da distribuição – parâmetros $\mu = 1319$ e $\sigma = 944,3$



(b) Função taxa de falha da distribuição – parâmetros $\beta = 1.21$ e $\eta = 1637$

Figura 27 – Função taxa de falha da distribuição normal e Weibull.

5.3.3 Considerações Finais

No diagrama de Ishikawa se estruturou uma série de causas que podem levar à falha do equipamento. Essas causas de falhas estão fortemente relacionadas com deficiências no projeto, principalmente a questão do subdimensionamento dos vasos separadores, acarretando na presença de condensado e, conseqüentemente, prejudicando os componentes internos, seja por meio da corrosão ou afetando os sistemas auxiliares – lubrificação e refrigeração.

Além disso, o diagrama de causa e efeito também sugere que causas humanas e operacionais podem influenciar no processo de falha e/ou restauração do sistema, entre os quais podem-se citar registro inadequado (ou a falta dele) das ocorrências no equipamento e a

política de manutenção sem acompanhamento dos indicadores de desempenho (tempos entre falhas, tempos de reparo e disponibilidade, por exemplo). Neste sentido, a interação manutenção-operação deve estar na mais perfeita harmonia. As atividades de diagnósticos são um exemplo de responsabilidade que é compartilhada pela manutenção e operação. Em geral, o operador é reconhecido como o “dono” do equipamento e, portanto, o levantamento de dados e a identificação de desvios da normalidade do equipamento são de sua responsabilidade. Já o reparo da máquina é uma atribuição da manutenção, porém muito dependente da percepção dos sinais de falha.

A automação do processo de operação do equipamento minimizou a influência do aspecto humano e alterou o ambiente de trabalho. O que antes possuía uma maior interação de ação homem-máquina, passou a ser uma interface homem-*software*-máquina, exigindo mais esforços cognitivos (atenção, memória, percepção, etc.). Porém, atividades como a de partida/parada do equipamento, que envolve maior aproximação operador-máquina, tem o potencial de criar condições latentes de falhas ou até mesmo causar diretamente uma falha no compressor.

A estimação dos parâmetros para a modelagem da taxa de falha apresentou resultados mais satisfatórios para a distribuição normal, indicando que esta distribuição apresenta uma maior utilidade para o contexto deste trabalho (conjunto de dados analisados). No entanto, é importante destacar que tal distribuição apresenta aplicações muito específicas em confiabilidade, isto é, não é amplamente empregada em estudos mais rigorosos como, por exemplo, para o planejamento da manutenção (determinação do intervalo de manutenções preventivas). Por outro lado, cabe destacar que o comportamento crescente da taxa de falha nas duas distribuições utilizadas validou a análise realizada no diagrama de Ishikawa, que sugeriu uma predominância de causas relacionadas ao desgaste.

5.4 ETAPA 4: ANÁLISE DA CONFIABILIDADE HUMANA (SPAR-H)

O nível de automação dos compressores de CO₂ possibilita uma operação quase livre de atuação humana para a realização de manobras. Essa característica modificou as atividades desempenhadas pelos operadores, que passaram a realizar mais tarefas de monitoramento e verificação. Porém, existem situações nas quais os operadores desempenham um papel mais decisivo na operação: as tarefas de partida/parada do equipamento e o controle de anormalidade do sistema (cenário de falha).

As duas tarefas citadas são consideradas como críticas devido às severas condições de operação do compressor. No entanto, a tarefa escolhida para análise da confiabilidade humana foi a partida do compressor, pelos seguintes motivos: (1) a tarefa é considerada como crítica e de alto risco; (2) entre as atividades realizadas pelo operador, ainda que apoiada pela automação do sistema, é uma das que mais necessita da intervenção humana; e (3) as atividades desenvolvidas em um cenário de falha influenciam um resultado negativo de erro humano. Portanto, o evento em análise é “falha em partir o compressor”.

5.4.1 Tarefa de Partida do Compressor

Realizar a partida do compressor alternativo de pistão horizontal é uma tarefa que envolve atividades de ação e diagnóstico. As manobras de partida do compressor são realizadas via sala de controle e em campo. Portanto, é imprescindível uma comunicação eficiente. De forma geral, a tarefa envolve os seguintes procedimentos:

- Verificação do nível, temperatura e pressão do óleo;
- Pré-aquecimento do nível de óleo (se necessário);
- Alinhamento dos sistemas de resfriamento (camisas, caixa de gaxetas, motor e permutadores) e verificação se de fato existe fluxo da AGR;
- Alinhamento do vent geral;
- Drenagem dos *dampers* (linha de gás, separadores de condensado, sistema de lubrificação, resfriador de gás etc.);
- Certificação do sistema de proteção;
- Certificação da disponibilidade de CO₂ na máquina;
- Certificação dos bloqueios da descarga, se estão abertos;
- Efetuação de *Trip* teste na bomba de óleo e no lubrificador;
- Confirmação da partida da máquina com a sala de controle;
- Abertura do bloqueio de reciclo na descarga do 1º estágio;
- Abertura lenta da válvula de sucção e do dreno do 1º estágio;
- Ajuste das variáveis (pressão e vazão) via sala de controle;
- Durante a pressurização, acompanhamento das variáveis temperatura, pressão e vibração;
- No caso de partida pós-falha, realização de amaciamento de componentes que assim o exigem;

- Após as condições de operação atingirem os níveis de funcionamento normal, verificação ao redor do compressor para detectar anormalidades (vazamento, ruídos, vibrações).

Uma das premissas da partida do compressor é que os operadores seguem atentamente as orientações contidas no procedimento. A questão de segurança é uma prioridade para a organização e, considerando o nível de importância da atividade, registra-se que o procedimento é seguido fielmente ao que está escrito. Entretanto, admite-se uma margem de desvio de no máximo 10 % (de não cumprimento), o que pode ser atribuído às mudanças no projeto.

Apesar do envolvimento dos operadores de painel na partida do compressor, a aplicação do método SPAR-H é baseada nas atividades desenvolvidas pelo operador de campo. A tarefa de partida do compressor pode ser assim discriminada:

- Característica cognitiva: realizar a leitura e a interpretação das variáveis (pressão, temperatura, vazão, nível de óleo etc.) e identificar as anormalidades (vazamento, ruído anormal, vibração anormal etc.).
- Característica de ação: abrir/fechar válvulas, realizar testes nos sistemas auxiliares, amaciar os componentes (engaxetamento, por exemplo) etc.

5.4.2 Análise dos PSFs

A quantificação da probabilidade de erro humano levou em consideração todos os oito fatores de desempenho humano (PSF) na execução da tarefa, seja de característica cognitiva ou de ação. Os níveis dos fatores delimitadores dos PSFs foram avaliados e escolhidos conforme os seguintes critérios:

a) Tempo

A tarefa de partida do equipamento não é limitada pelo fator tempo. Apesar da extrema importância do equipamento, quanto maior o tempo indisponível tanto maior será o lucro cessante, a necessidade do rápido retorno de operação do equipamento não é um fator limitante da tarefa. O procedimento e as instruções de trabalho foram projetados para assegurar que exista tempo com folga para que todas as atividades sejam realizadas de forma segura e até mesmo permitir que medidas de resposta sejam concretizadas caso algum evento anormal ocorra. Portanto, nas atividades de ação, o nível de tempo disponível corresponde a

tempo superior a cinco vezes o tempo requerido (nominal). Para as atividades de diagnóstico, o nível assinalado é o tempo extra – entre uma e duas vezes o tempo nominal.

b) Estresse / agente estressor

Esse PSF pode ser influenciado tanto por fatores ambientais físicos (calor, ruído, umidade, radiação, ventilação etc.) quanto por fatores mentais (carga horária excessiva, apreensão frente a tarefas perigosas etc.). Dada à possibilidade de combinação desses fatores, a avaliação do PSF não resultou na seleção de apenas um nível.

As atividades de partida desempenhadas pelo operador em campo estão sujeitas às intempéries da natureza (o calor excessivo em algumas épocas do ano, chuva etc.) e ao ruído. As condições de operação oferecem um risco potencial de causar danos irreparáveis ao equipamento no caso de algum sinistro ocorrer e, conseqüentemente, provocar lesões e até a morte de pessoas que estiverem próximas ao equipamento. Portanto, há certo nível de tensão quanto a esse risco. Por outro lado, considerando a experiência do operador em detectar as anormalidades que possam desencadear tal desastre e a segurança oferecida pelos sistemas de proteção, que forçam a parada do equipamento (*trip*) em caso de anormalidade, considera-se que o nível de estresse é nominal para as atividades de diagnóstico e ação.

Quanto à carga horária de trabalho, é comum que funcionários realizem jornada de trabalho dobrada, principalmente nos casos em que é requisitada a presença do profissional mais experiente para o desempenho de atividades mais complexas. Outra questão vem mudando o ambiente de trabalho na organização. A empresa vem passando por uma reestruturação interna e teve alguns quadros de efetivos reduzidos, o que significa menos pessoas para realizar as mesmas atividades. Assim, em um cenário no qual se pode ter uma acumulação de tais fatores (redução de efetivo, carga horária excessiva por dobra de turno, fatores ambientais e o próprio risco da atividade), o nível de estresse também pode ser classificado como alto.

c) Complexidade

A automação e a experiência auxiliam a operação do equipamento, porém não tornam a atividade trivial. A partida do compressor depende do bom funcionamento de todos os seus componentes, inclusive os seus sistemas auxiliares. Isso significa que mais variáveis terão que ser monitoradas e sistemas auxiliares, inicializados. As atividades não requerem grande esforço físico, contudo são influenciadas pelas condições ambientais e ergonômicas. Exige-se

também um conhecimento amadurecido dos princípios de funcionamento do equipamento, principalmente para auxiliar no diagnóstico de anormalidades que eventualmente possam ocorrer. Por isso, há a necessidade de profissional experiente.

Considerando esses aspectos, entende-se que, apesar da automação e da instrumentação, o nível compreendido das atividades de diagnóstico e de ação corresponde ao moderadamente complexo. Esta classificação também levou em consideração os aspectos discutidos na análise da tarefa (Seção 5.2).

d) Experiência

Ainda que possa existir algum operador com pouca experiência na unidade, a partida do compressor sempre conta com profissionais mais experientes. Além disso, independentemente da experiência, todos os funcionários, ao ingressarem na empresa, passam por um período de um ano de treinamento. Após esse curso de ingresso, os funcionários são continuamente submetidos à reciclagem de treinamentos. O operador entrevistado tem experiência superior a dez anos na função, no entanto, tem apenas dois anos na unidade em estudo. Assim, selecionou-se o nível nominal para ambas as atividades.

e) Procedimento

A tarefa de partida do compressor de CO₂ possui um procedimento padrão específico, que é seguido pela operação. Esse documento é revisado continuamente e sempre que necessário, porém não é visto como um documento 100 % completo. Por exemplo, não existem evidências de alertas de fatores humanos (necessidade de maior aptidão física, maior concentração/atenção, comunicação etc.) na execução da tarefa. As instruções estão orientadas para o auxílio de atividades cognitivas e de ação em um único documento – não existe procedimento operacional específico para diagnóstico de anormalidades. Assim, para efeitos da quantificação da probabilidade de erro humano na tarefa de ação, considerou-se a classificação do procedimento como nominal e, na tarefa de diagnóstico, considerou-se a existência de um procedimento incompleto.

f) Ergonomia / IHM

O projeto do sistema de compressão suporta o desempenho correto, porém não maximiza o desempenho. A interface do computador é adequada, no entanto, nem todas as variáveis de controle estão disponíveis no painel. Algumas leituras são realizadas em campo

em regiões não ergonomicamente favoráveis. Portanto, considerou-se que o fator delimitador é nominal.

g) Aptidão para o Serviço

Aptidão para o serviço avalia se o indivíduo que realiza a tarefa é física e mentalmente adequado para a sua execução no momento. Do ponto de vista das condições físicas, as atividades desempenhadas na partida do compressor não requerem aptidões especiais. Apesar de o compressor localizar-se acima do nível do solo, são necessários apenas dois lances de escadas. Os sistemas auxiliares também não exigem esforços na realização das manobras.

Devido aos riscos envolvidos na tarefa, dificilmente um operador realizará a atividade sem o foco necessário. Esse mesmo raciocínio elimina a possibilidade de o indivíduo estar sob efeito de drogas (legal ou ilegal) ou distraído. A segurança sempre é colocada em primeiro lugar. Caso haja algo que possa colocar em risco a própria vida ou dos colegas de trabalho, alguma medida é tomada, mesmo que isso resulte na paralização da atividade. Portanto, neste trabalho é considerado que o nível do fator delimitador é nominal.

h) Relações de Trabalho

Os processos de trabalho incluem quaisquer fatores de gerenciamento, organização ou supervisão que possam afetar o desempenho da atividade. De forma geral, existe uma boa relação interpessoal entre os membros da organização. Por outro lado, alguns fatores afetam negativamente o desempenho das atividades:

- A comunicação entre as equipes de operação, manutenção e auxiliares apresentam entraves relacionados à investigação de eventos – cultura da culpa;
- Faltam políticas mais direcionadas para a investigação de incidentes e anormalidades ocorridos na vida diária da operação com envolvimento dos profissionais das diferentes áreas;
- O preenchimento inadequado do livro de turno (falta de registro dos sinais de falha, informações desatualizadas etc.);
- O registro inadequado dos eventos de falha – informações incompletas;
- As questões comportamentais afetam a realização das atividades, como, por exemplo, o atraso na liberação das permissões de trabalho;
- A mudança no quadro funcional – troca de gerentes, transferência de membros da equipe etc.

Portanto, avaliando-se todo o conjunto das características levantadas, decidiu-se considerar dois cenários. No cenário mais brando, ponderou-se o nível do fator delimitador como nominal. No cenário mais negativo, a relação de trabalho é entendida como ruim, por que existem elementos suficientes para influenciar negativamente nas atividades.

5.4.3 Cálculo da Probabilidade do Erro Humano

O próximo passo para a quantificação do erro humano é atribuir a cada PSF seu valor correspondente de multiplicador para as tarefas de ação e diagnóstico. A Tabela 6 e a Tabela 7 apresentam os níveis dos oito PSFs selecionados, bem como o valor de cada multiplicador, considerando dois cenários. A seleção dos níveis dos PSFs presentes nos Anexos A e B contou com o auxílio dos Apêndices G e H.

Tabela 6 – Multiplicadores do PSF considerando um cenário mais brando.

Tarefa de Ação		Tarefa de Diagnóstico	
PSF	Multiplicador	PSF	Multiplicador
Tempo	0,1	Tempo	0,1
Estresse/Estressor	1	Estresse/Estressor	1
Complexidade	2	Complexidade	2
Experiência/Treinamento	1	Experiência/Treinamento	1
Procedimento	1	Procedimento	20
Ergonomia/IHM	1	Ergonomia/IHM	1
Aptidão	1	Aptidão	1
Relações de trabalho	0,5	Relações de trabalho	0,8

Tabela 7 – Multiplicadores do PSF considerando um cenário mais negativo.

Tarefa de Ação		Tarefa de Diagnóstico	
PSF	Multiplicador	PSF	Multiplicador
Tempo	0,1	Tempo	0,1
Estresse/Estressor	2	Estresse/Estressor	2
Complexidade	2	Complexidade	2
Experiência/Treinamento	1	Experiência/Treinamento	1
Procedimento	1	Procedimento	20
Ergonomia/IHM	1	Ergonomia/IHM	1
Aptidão	1	Aptidão	1
Relações de trabalho	5	Relações de trabalho	2

Seguindo a metodologia, há que se avaliar a quantidade de PSF que tem influência negativa, isto é, quando o valor do multiplicador é maior que um. Essa verificação é

necessária para avaliar se é preciso realizar o ajuste no cálculo da probabilidade do erro humano. No primeiro cenário nenhuma das tarefas apresentaram três ou mais PSFs com influência negativa, o que significa que o cálculo pode ser realizado por meio da Equação 2.1. Assim, para a tarefa de ação e diagnóstico, a probabilidade de erro humano é dada por:

$$HEP_{Ação/Diag.} = NHEP_{Ação/Diag.} \times \prod PSFs \quad (2.1)$$

$$HEP_{Diagnóstico} = 0,01 \times (0,1 \times 1 \times 2 \times 1 \times 20 \times 1 \times 1 \times 0,8) = 0,032$$

$$HEP_{Ação} = 0,001 \times (0,1 \times 1 \times 2 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0,5) = 0,0001$$

A probabilidade de erro total é calculada por meio da Equação 2.3:

$$HEP_{combinado} = HEP_{Diagnóstico} + HEP_{ação} \quad (2.3)$$

$$HEP_{combinado} = 0,0320 + 0,0001 = 0,0321$$

Considerando agora o cenário mais negativo, verificou-se a presença de três PSFs negativos para a tarefa de ação e quatro PSFs negativos na tarefa de diagnóstico. Assim, a probabilidade de erro humano será calculada a partir da Equação 2.2:

$$HEP_{Ação/Diag.} = \frac{NHEP \times \prod PSF}{NHEP \times (\prod PSF - 1) + 1} \quad (2.2)$$

$$HEP_{Diagnóstico} = \frac{0,01 \times (0,1 \times 2 \times 2 \times 1 \times 20 \times 1 \times 1 \times 2)}{0,01 \times (0,1 \times 2 \times 2 \times 1 \times 20 \times 1 \times 1 \times 2 - 1) + 1} = \frac{0,16}{1,15} = 0,139$$

$$HEP_{Ação} = \frac{0,001 \times (0,1 \times 2 \times 2 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 5)}{0,001 \times (0,1 \times 2 \times 2 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 5 - 1) + 1} = \frac{0,002}{1,001} = 0,002$$

A probabilidade de erro humano total também é calculada por meio da Equação 2.3:

$$HEP_{combinado} = 0,139 + 0,002 = 0,141$$

5.4.4 Considerações Finais

As atividades relacionadas com o compressor são apoiadas pelo nível de automação e instrumentação do sistema. A tarefa de partida do equipamento não é diferente, apesar de exigir mais esforço físico do que o habitual e um maior nível de atenção. Ainda assim, não se esperava uma probabilidade muito alta de falha humana. A aplicação do método resultou em um valor de 3,2 % de probabilidade de erro humano.

Esse resultado foi validado pelos operadores e pelo supervisor de operação da empresa. A avaliação positiva (valor menor ou igual a um) dos PSFs contribuiu para um resultado final de alta confiabilidade humana – 96,8 %. A equipe garante que os procedimentos são seguidos em sua totalidade, sendo ainda acompanhados de um *checklist*. Apesar de a planta ser bastante antiga, o equipamento conta com um moderno sistema de controle e de proteção no qual a interface homem-máquina proporciona uma vantagem para a operação. Quanto à disponibilidade de tempo, este não é um fator delimitador da tarefa. A partida do compressor obedece aos critérios de segurança. Portanto existe uma folga suficiente para realizar todos os procedimentos.

Por outro lado, existem duas observações que se contrapõem a este resultado. A primeira delas é que atualmente a empresa vem passando por uma série de mudanças e isso, direta ou indiretamente, provocou uma alteração no ambiente de trabalho. Essa possibilidade de um cenário mais negativo também foi modelada no SPAR-H. Nesse cenário, houve uma alteração de dois PSFs – “estresse/agente estressor” e “relações de trabalho”-, que resultou em uma mudança na probabilidade de falha – observou-se um aumento de 3,2 % para 14,1 % da probabilidade de erro humano, ou seja, quase cinco vezes mais.

Com a mecanização das funções, a organização possui um papel mais decisivo para garantir a confiabilidade de todo o sistema. Vale lembrar que dos oito PSFs utilizados no método SPAR-H, apenas um deles (a aptidão para o serviço) não tem uma relação direta com a organização. Portanto, uma alteração do ambiente de trabalho tem um potencial de causar um grande impacto no desempenho das atividades.

A segunda observação foi levantada pelo engenheiro de coordenação da operação. O engenheiro considera que, com base em sua experiência, a rotina diária da operação é fortemente influenciada por aspectos socioculturais. Esse pensamento confronta o resultado encontrado no primeiro cenário. Apesar de não ser explícito em qual atividade esse fenômeno tem mais influência, a probabilidade de erro humano de 3,4 % pode não representar a realidade do cenário atual. Portanto, a visão do engenheiro corrobora com o resultado do segundo cenário.

Contudo, é importante ainda ressaltar que o método SPAR-H foi desenvolvido para ser aplicado no ambiente da indústria nuclear. Isso sugere que, nos casos em que essa técnica é aplicada fora do ambiente industrial nuclear e os resultados não são compatíveis com a percepção do gestor, pode haver a necessidade de calibração dos valores de probabilidade de falha dos PSFs.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 CONCLUSÕES

Foi mostrado neste trabalho que é praticamente impossível criar um ambiente livre dos aspectos técnicos, humanos e organizacionais, principalmente o humano. Se todos os riscos fossem levados em consideração no projeto dos sistemas, este seria completamente engessado, sem mobilidade alguma. Portanto, um ambiente livre de condições organizacionais é impensável.

Quando se trata de questões humanas a literatura direciona o seguinte entendimento: por mais que o ambiente de trabalho seja completamente perfeito e seguro, é muito improvável a eliminação do fator humano. Neste caso, o autor deste trabalho sugere duas justificativas: (1) por mais tecnológico e autônomo que seja o sistema, em algum momento houve ou haverá uma interferência humana (o próprio projeto, a construção, a montagem, a manutenção etc.) e, portanto, está sujeito a erros; (2) o ser humano é extremamente complexo e sofre influência de dezenas de fatores que podem tanto maximizar, quanto minimizar o desempenho das atividades.

No estudo de caso deste trabalho, a delimitação do objeto foi realizada através do mapeamento das perdas de produção. A análise mostrou que os equipamentos dinâmicos (em especial as bombas e os compressores) são elementos críticos com o potencial de impactar não apenas a questão de segurança, mas também aspectos econômico-financeiros da organização.

A análise do ambiente operacional foi utilizada como ferramenta de apoio para a análise de confiabilidade do compressor e da confiabilidade humana na tarefa de partida. O uso desta ferramenta possibilitou uma compreensão de forma mais detalhada da rotina operacional dos trabalhadores e destacou alguns elementos que podem afetar o desempenho da operação, quais sejam:

- i. A transformação do ambiente de trabalho pela automação e instrumentação do processo. Este ambiente favorece a operação na realização das manobras e identificação de anormalidades via sala de controle. Por outro lado, esta alteração traz outras implicações como uma modificação na rotina de acompanhamento em campo, pode criar obstáculos na leitura de sinais de falhas caso essa rotina seja

inadequada e afetar a construção do conhecimento adquirido pela experiência em campo;

- ii. Existe uma quantidade superior de variáveis de sistemas auxiliares monitoradas quando comparados com o sistema principal. Este diagnóstico fortalece o conceito de que os sistemas auxiliares estão no mesmo nível de importância do sistema principal e precisa ser tratado como tal. Equipamentos dinâmicos de grande porte tendem a ser máquinas complexas e altamente dependentes dos sistemas auxiliares (lubrificação, refrigeração, proteção etc.);
- iii. Necessidade de identificação de variáveis críticas para o correto monitoramento do equipamento e projeto das telas da sala de controle. Isto pode evitar desvios de atenção nas atividades de monitoramento via sala de controle.

A complementação da análise foi realizada utilizando o diagrama de Ishikawa. Nesta etapa, foram identificadas algumas causas que afetam o bom funcionamento do compressor e/ou ocasionam a sua parada. Destes elementos, a maior parte está relacionada com causas técnicas, mas que são influenciados por condições latentes (organizacionais) e humanas. No último caso, considerando apenas a área da operação (não levando em conta a manutenção, por exemplo), a atuação humana mostrou-se ter um papel intermediário no processo de falha, principalmente devido à própria configuração da automação da operação.

Os principais problemas identificados foram: ruído e vibração anormal, vazamentos de CO₂, sobreaquecimento e desgaste de material (pistões e válvulas). A discussão realizada na construção do diagrama de Ishikawa identificou uma possível causa comum - o subdimensionamento dos vasos separadores. Questões de projeto são classificadas como elementos de origens organizacionais, mas que por vezes esses “desvios” são incorporados na rotina operacional através de ajustes. Além disso, a organização não dispõe de uma estrutura voltada para gestão de falhas, o que dificulta um planejamento adequado da manutenção e, conseqüentemente, a prevenção de falhas.

A validação dos fatores técnicos discutidos na construção do diagrama de Ishikawa foi realizada pela modelagem da taxa de falha. O processo de estimação de parâmetros obteve resultados satisfatórios para a distribuição normal. A forma crescente da taxa de falha confirma a incidência de falhas com características de desgaste. Este cenário indica que o equipamento tem mais probabilidade de falhar ao longo do tempo, portanto requer medidas de prevenção mais eficazes. Este objetivo pode ser alcançado com a aplicação de metodologias mais robustas como, por exemplo, a metodologia MCC (Manutenção Centrada em

Confiabilidade). Com esta metodologia é possível definir uma melhor estratégia da manutenção com base na análise quali-quantitativa da falha.

Uma análise mais detalhada de fatores humanos foi realizada através da aplicação do SPAR-H na tarefa de partida/parada do compressor. A partir dessa técnica foi possível perceber que, com a mecanização das funções, a organização possui um papel mais decisivo para garantir a confiabilidade de todo o sistema. No primeiro momento, a análise resultou em uma confiabilidade de 96,8 %, porém com a revisão gerencial esse valor reduziu para 85,9 %. Na avaliação do segundo cenário, que resultou na redução da confiabilidade humana, levou-se em consideração alterações no clima organizacional com impacto nas relações de trabalho e aumento do estresse. Este resultado sugere que a automação não deve ser a única barreira do sistema. Os operadores devem ter todos os requisitos necessários para o desempenho das atividades, assim como o ambiente organizacional deve ser favorável para o sucesso da tarefa.

Por fim, a metodologia utilizada conseguiu identificar aspectos sociotécnicos que influenciam no sistema de operação do compressor de CO₂. A automação tem um papel importante para reduzir as influências humanas (operador), contudo, aspectos organizacionais tornam-se mais influentes no desempenho das atividades.

6.2 SUGESTÕES

Este trabalho foi desenvolvido através de um estudo de caso com base em dados reais de uma indústria petroquímica. Sabe-se que o ambiente industrial é bastante dinâmico e que as informações nem sempre são acessíveis, ou quando se tem o acesso, nem sempre os dados estão em sua totalidade disponíveis devido às questões de sigilo. Essas duas situações se fizeram presentes no desenvolvimento da pesquisa. Além disso, no período de desenvolvimento deste trabalho a empresa passou por mudanças internas o que implicou em restrições no acesso das instalações da organização e, conseqüentemente, aos dados.

Este trabalho teve como premissa que a falha em sistema complexo possui uma caracterização sistêmica com influências sociotécnica. Para realizar uma análise em um caso real da indústria foram aplicadas ferramentas de confiabilidade, porém de forma isolada. Neste caso, existe um campo aberto para o desenvolvimento e validação de uma metodologia mais robusta que tenha como resultante a análise da confiabilidade integrada. Sugere-se nessa nova ferramenta a inclusão do estudo da influência de aspectos socioculturais no desempenho das tarefas ou perda da produção.

Além disso, considerando o atual cenário brasileiro de crise energética e a tendência na interrupção de operações devido à falta de energia, pode-se considerar a inclusão da análise do consumo e/ou perda de energia na classificação da criticidade do equipamento. Nesse contexto, existe uma oportunidade para elaborar um conceito que relacione confiabilidade operacional e energia.

REFERÊNCIAS

ABDOLLAHI, A. Root Cause and Error Analysis. **Iranian Journal of Pathology**, vol. 9, iss. 2, pp. 81 – 88, 2014.

AHMAD, M.; PONTIGGIA, M.; DEMICHELA, M. Human and organizational factor risk assessment in process industry and a risk assessment methodology (MEDIA) to incorporate human and organizational factors. **Journal of Chemical Engineering Transactions**, vol. 36, p. 565-570, 2014.

AHMED, Q.; KHAN, F.; AHMED, S. Improving safety and availability of complex systems using a risk-based failure assessment approach. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, vol. 32, p. 218-229, 2014.

AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS - AICHE. Center for Chemical Process Safety (CCPS). **Guidelines for preventing human error in process safety**. New York: Wiley-AIChE, 1994.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE - API. **API Standard 618** - reciprocating compressors for petroleum, chemical and gas industry services. [S.l.: s.n.], 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994.

ÁVILA FILHO, S.; DIAS, C. Reliability research to design barriers of sociotechnical failure. In: **Annual European Safety and Reliability Conference (ESREL)**, 27., 2017, Portorož. Annals. [S.l.]: CRC PRESS, 2017.

ÁVILA FILHO, S.; MENEZES, D. Control of systemic failure through design criteria, RISKDyn. In: **annual European Safety and Reliability Conference (ESREL)**, 27., 2017, Portorož. Annals. [S.l.]: CRC PRESS, 2017.

ÁVILA FILHO, S. Reliability analysis for socio-technical system, case propene pumping. **Journal Engineering Failure Analysis**, vol. 56, p. 177–184, 2015.

_____. Prevenção de riscos operacionais e dinâmicos na indústria de processos, uma discussão exploratória. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, 20., 2014, Florianópolis. [S.l.: s.n.], 2014.

_____. Worker behavior changing by dynamic culture. In: **Global Congress on Process Safety (GCPS)**, 9., 2013, San Antonio. [S.l.]: AIChE, 2013a.

_____. Review of Risk Analysis and Accident on the Routine Operations in the Oil Industry. **Latin American Conference on Process Safety**, 5., 2013, Roma. [S.l.]: AIChE, 2013b.

_____. Análise de falha em Processos Complexos. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, 19., 2012, Búzios. [S.l.: s.n.], 2012.

BAO, Y., et al. Analysis of Power System Operation Reliability Incorporating Human Errors. In: **International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)**, 17., 2014, Hangzhou. [S.l.: s.n.], 2014.

BARRINGER, H. P.; KOTLYAR, M. Reliability of Critical Turbo/Compressor Equipment. In: **International Conference on Process Plant Reliability**, 5., 1996, Houston. [S.l.]: Gulf Publishing Company, 1996.

BHAUMIK, S. K. A view on the general practice in engineering failure analysis. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, vol. 9, n. 3, p. 185-192, 2009.

BIRD, F. E. J.; GERMAIN, G. L. **Practical loss control leadership**. Georgia: International Loss Control Institute, 1985.

BORING, R. L. Fifty years of THERP and human reliability analysis. In: **Probabilistic Safety Assessment and Management**, 11., 2012, Helsinki. [S.l.]: IAPSAM & ESRA, 2012.

BRIDGES, W.; TEW, R. Human Factors Elements Missing from Process Safety Management (PSM). In: **Global Congress on Process Safety**, 6., San Antonio, 2010. [S.l.]: AIChE, 2010.

CACCIABUE, P. C. Human factors impact on risk analysis of complex systems. **Journal of Hazardous Materials**, vol. 71, p. 101–116, 2000.

_____. Human error risk management for engineering systems: a methodology for design, safety assessment, accident investigation and training. **Reliability Engineering e System Safety**, vol. 83, iss. 2, p. 229–240, 2004.

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY – CCPS. **Guidelines for Auditing Process Safety Management Systems**. New York: AIChE, 1993.

CHENG, C. M.; HWANG, S. L. Applications of integrated human error identification techniques on the chemical cylinder change task. **Journal of applied ergonomics**, vol. 47, p. 274-284, 2015.

CONCEIÇÃO, M. M. P. **O uso do método de análise da confiabilidade humana spar-h na quantificação da probabilidade de erro humano no processo de instalação de gás lp em uma indústria**. 2016. 173 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

DENNIES, D. P. The Organizational of a Failure Investigation. **Journal of Practical Failure Analysis**, vol. 2, iss. 3, p. 11-41, 2002.

_____. **How to organize and run a failure investigation**. ASM International, Ohio, 2005.

DODGE, R. B. Patterns of Root Cause in Workplace Injury. **International Journal of Workplace Health Management**, vol. 5 Iss. 1, pp. 31 – 43, 2012.

DÓREA, S. S. P. **Investigação nas operações de um frigorífico de aves para definição de mix de produto e entendimento das falhas sócio-técnicas**. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.

EMBREY, D. **Preventing human error**: developing a consensus led safety culture based on best practice. London: Human Reliability Associates Ltd., 2000.

FORESTER, J. A.; COOPER, S. E.; KOLACZKOWSKI, A. M.; BLEY, D. C. An overview of the evolution of human reliability analysis in the context of probabilistic risk assessment. **Sandia Report**. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2009.

FRENCH, S.; BEDFORD, T.; POLLARD, S. J. T.; SOANE, E. Human reliability analysis: a critique and review for managers. **Journal of Safety Science**, vol. 49, p. 753–763, 2011.

GALICIA, H. J.; HE, Q. P.; WANG, J. Statistics pattern analysis based fault detection and diagnosis. In: **Proceedings of CPC Conference**, 8., 2012. [S.l.: s.n.], 2012.

HETHERINGTON, C.; FLIN, R.; MEARNNS, K. Safety in shipping: the human element. **Journal of Safety Research**, vol. 37, p. 401–411, 2006.

HEUT, R. The interdisciplinary nature of failure analysis. In: **proceedings of the first ASM International Conference on Failure Prevention**, 1., 2000, Cleveland. [S.l.]: ASM International, 2000.

HOLLNAGEL, E. **The NO view of 'human error'**. Publicado em 2016. Disponível em: <<http://erikhollnagel.com/ideas/no-view-of-human-error.html>>. Acesso em: 20 dez. 2017.

_____. **Safer complex industrial environments**: a human factors approach. London: CRC Press, 2010.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL VOCABULARY (IEV). **IEC 60050-191**. Chapter 191: Dependability and quality of service. International Electrotechnical Commission, Geneva, 1990.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **The ISO survey of management system standard certifications 2015**. Disponível em: <<http://www.iso.org/iso/iso-survey>>, acesso em: 20/07/2016.

JOHNSEN, S. O.; KILSKAR, S. S.; FOSSUM, K. R. Missing focus on human factors – organizational and cognitive ergonomics – in the safety management for the petroleum industry. **Journal of Risk and Reliability**, vol. 231, iss. 4, p. 400-410, 2017.

JOHNSON, D. M. A review of fault management technique used in safety-critical avionic systems. **Journal of Progress in Aerospace Sciences**, vol. 32, iss. 5, p. 415-431, 1996.

KARIUKI, S. G.; LOWE, K. Increasing human reliability in the chemical process industry using human factors techniques. **Journal of Process Safety and Environmental Protection**, vol. 84, p. 200–207, 2006.

KNEGTERING, B.; PASMÁN, H. J. Safety of the process industries in the 21st century: a changing need of process safety management for a changing industry. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, vol. 22, p. 162-168, 2009.

KOHN, L. T.; CORRIGAN, J. M.; DONALDSON, M. S. **To err is human: building a safer health system**. Washington: National Academy Press, 2000.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001, 388 p.

LEBLEU, J.; PEREZ, R. **Operator's guide to rotating equipment: an introduction to rotating equipment construction, operating principles, troubleshooting, and best practice**. Bloomington: AuthorHouse, 2014.

LEES, F. P. **Lees's Loss Prevention in the Process Industries**. 3. ed. vol. 1. Oxford: Butterworth-Heinemann Elsevier, 2015.

_____. Introduction. In: _____. **Lees's Loss Prevention in the Process Industries**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann Elsevier, 2005.

LI, Y.; THIMBLEBY, H. Hot cheese: a processed Swiss cheese model. **Journal of the Royal College of Physicians of Edinburgh**, vol. 44, iss. 2, p. 116–121, 2014.

LILIANE, L. A new model of Ishikawa diagram for quality assessment. **Journal of Materials Science and Engineering**, vol. 161, 2016.

LORENZO, D. K. **API 770: a guide for the reduction of human errors**. Washington: API Publishing Services, 2001.

LUNA, A. V. M. **Gestão e melhoria de processos em uma indústria farmacêutica pública: estudo de caso do processo de fabricação de comprimidos**. Dissertação (Mestrado). 2013. 77 f. Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

MEISTER, D. **Human factors in reliability**. New York: McGraw-Hill, 1966.

MESHKATI, N. Critical human and organizational factors: considerations for design and operation of petrochemical plants. In: **Oil and Gas Exploration and Production Conference, Society of Petroleum Engineers**, 1991, The Hague. [S.l.]: Society of Petroleum Engineers, p. 637-634, 1991.

MUCHINSKY, P.M. **Psicologia organizacional**. 7. ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004. 508 p.

NELMS, C. R. The latent causes of industrial failures: how to identify them, and what to do about them. In: **Annual Human Factors Meeting**, 6, 1997, Orlando. [S.l.]: IEEE, 1997.

NEW ZEALAND INSTITUTE OF CHEMISTRY – NZIC. Production of Chemicals – ammonia and urea production. 2008. Disponível em: <<https://nzic.org.nz/ChemProcesses/production/>>. Acesso em: 27 jul. 2017.

NIEUWHOF, G. W. E. The concept of failure in reliability engineering. **Journal of Reliability Engineering**, vol. 7, Iss. 1, p. 53-59, 1984.

NORMAN, D. **The design of everyday things**. New York: Currency-Doublday, 1988.

US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION REGULATION - NUREG. **NUREG 6883** – the SPAR-H human reliability analysis method. Washington: U.S. Department of Energy, 2005.

OLIVEIRA, U. R.; PAIVA, E. J.; ALMEIDA, D. A. Metodologia integrada para mapeamento de falhas: uma proposta de utilização conjunta do mapeamento de processos com as técnicas FTA, FMEA e a análise crítica de especialistas. **Revista Produção**, v. 20, n 1, p. 77-91, 2010.

PALLEROSI, C. A. Confiabilidade humana: nova metodologia de análise qualitativa e quantitativa. In: **Simpósio Internacional de Confiabilidade (SIC)**, 6., Florianópolis, 2008. Florianópolis: ReliaSoft Corporation, 2008.

PALLEROSI, C. A.; MAZZOLINI, B. P. M.; MAZZOLINI, L. R. **Confiabilidade humana: conceitos, análises, avaliação e desafios**. São Paulo: AllPrint Editora, 2011.

PERROW, C. **Normal accidents: living with high-risk technologies**. New York: Basic Books, 1984.

PRYOR, P., TEPE, S. Foundation Science. In: **Health and Safety Professionals Alliance (HaSPA)**. Victoria: Safety Institute of Australia, 2012. Disponível em: <<http://www.ohsbok.org.au/wp-content/uploads/2013/12/38-Practice-Model-of-practice.pdf?x71776>>. Acesso em: mar. 2016.

RASMUSSEN, J. Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. **IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics**, vol. 13, iss. 3, 1983.

RAUSAND, M.; OIEN, K. The basic concepts of failure analysis. **Journal of Reliability Engineering and System Safety**, vol. 53, iss. 1, p. 73-83, 1996.

REN, J. et al. A methodology to model causal relationships on offshore safety assessment focusing on human and organizational factors. **Journal of Safety Research**, vol. 39, p. 87–100, 2008.

REASON, J. **Human Error**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

_____. **Organizational Accidents Revisited**. Boca Raton: CRC Press - Taylor e Francis Group, 2016.

SAKURADA, E. Y. **Metodologia para análise de confiabilidade dinâmica**. 259 f. Tese (Doutorado) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SANTANA, D. D. **Interpretação da Região de Abrangência na Estimação de parâmetros**. 139 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

SARTORI, I.; AMARO, C. A.; SOUZA JÚNIOR, M. B.; EMBIRUCÚ, M. Detecção, diagnóstico e correção de falhas: uma proposição consistente de definições e terminologias. **Revista Ciência e Engenharia**, vol. 21, p. 41 – 53, 2012.

SCUTTI, J. J.; MCBRINE, W. J. In: _____. **ASM Handbook: Failure Analysis and Prevention**, 2002. [S.l.: s.n], vol. 11, 2002.

SCHWAAB, M. M.; PINTO, J. C. **Análise de dados experimentais I: fundamentos da estatística e estimação de parâmetros**. Rio de Janeiro: e-papers, 2007. 462 p.

SHAPPELL, S. A.; WIEGMANN, D. A. A human error approach to accident investigation: the taxonomy of unsafe operations. **The International Journal of Aviation Psychology**, vol. 7, iss. 4, p. 269-291, 1997.

_____. **The human factors analysis and classification system–hfacs**. Final Report. Washington: U.S. Department of Transportation - Federal Aviation Administration, 2010. Disponível em: <https://www.nifc.gov/fireInfo/fireInfo_documents/humanfactors_classAnly.pdf>. Acesso em: 13 Fev. 2016.

STENBERG JUNIOR, R. **Psicologia Cognitiva**. Porto Alegre: Artmed, 2008.

SWAIN, A. D.; GUTTMAN, H. E. **Handbook of Human Reliability Analysis with Reference to Nuclear Power Plant Applications**. Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1983.

TAM, A. S. B.; GORDON, L. Clarification of Failure Terminology by Examining a Generic Failure Development Process. **International Journal of Engineering Business Management**, vol. 1, iss. 1, p. 33-36, 2009.

VALIS, D.; BARTLETT, L.M. The failure phenomenon: a critique. **International Journal of Performability Engineering**, vol. 6, iss. 2, p. 181-190, 2010.

VENKATASUBRAMANIAN, V., RENGASWAMY, R., YIN, K., KAVURI, S. N. A review of process fault detection and diagnosis: Part I: Quantitative model-based methods. **Journal of Computers & Chemical Engineering**, vol. 27, p. 293–311, 2003.

VERAS, R. M. **Uma sistemática para análise de degradação de sistemas técnicos**. 193 f. Dissertação (Mestrado) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

VIDAL, M. C.; CARVALHO, P. V. R. **Ergonomia Cognitiva – Raciocínio e Decisão no Trabalho**. Rio de Janeiro: EVC Editora, 2008.

WANG, K.; YIN, Q.; WANG, X. Equipment Dynamic Failure Model and Case Study. In: **International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS)**, 8., 2009, Chengdu. [S.l.]: IEEE, 2009.

WEI, S.; ERPING, W. Organizational Factors and Safety: the Mediation Effects of Organizational Processes. In: **International Conference on Biomedical Engineering and Informatics**, 3., 2010, Yantai. [S.l.]: IEEE, 2010.

WHITTINGHAM, R. B. **The blame machine**: why human error causes accidents. Oxford: Butterworth-Heinemann Elsevier, 2004.

XUECAI, X.; DEYONG, G. Human factors risk assessment and management: Process safety in engineering. **Journal of Process Safety and Environmental Protection**, vol. 113, p. 467-482, 2018.

YOUNG, B.; COLEMAN, R. **Operational risk assessment**: the commercial imperative of a more forensic and transparent approach. Chichester: John Wiley e Sons, 2009.

GLOSSÁRIO

Causa raiz	É o fator casual mais básico, ou fatores, que, se corrigidos ou removidos, evitarão a recorrência de uma situação ou reduzirá significativamente sua incidência (DODGE, 2012; ABDOLLAHI, 2014).
Defeito	Término da capacidade de desempenhar a função requerida sob condições especificadas podendo resultar na incapacidade total, ou na incapacidade parcial, intermitente ou não, no preenchimento da função (SARTORI et al., 2012).
Efeitos de falha	É a consequência que o modo de falha tem sobre a operação, função ou estado de um item (LAFRAIA, 2001 p. 108).
Modos de falha	Conjunto de efeitos pelos quais uma falha é observada (LAFRAIA, 2001 p. 105).
Perigo	Características inerentes ou físicas que têm potencial para causar danos às pessoas, propriedades ou meio ambiente, são as combinações de um material perigoso, um ambiente operacional e certos eventos não planejados que podem resultar em um acidente (CCPS, 1993).
Risco	A combinação da frequência e consequência esperadas de um único acidente ou de um grupo de acidentes. (CCPS, 1993).
Risco dinâmico	Alterações do risco devido a mudanças relacionadas com os fatores humanos, organizacionais (clima organizacional, liderança etc.), variáveis ambientais, complexidade do processo e da tarefa.
Salvaguardas	Barreiras de segurança.
Sinais de falha	Sinais detectáveis de condições de deterioração e / ou ações adversas que fornecem aviso de uma possível falha (TAM; GORDON, 2009).
Sistema complexo	Sistema caracterizado por possuir alto nível de interligação entre unidades, alto nível de automação do processo e equipamentos, muitos parâmetros de controle com potenciais interações, influência de estressores físicos e/ou psicológicos na realização da tarefa, inexistência de procedimentos escritos etc.
Sistema sociotécnico	Sistema que tem seus processos, tarefas e operações influenciados por fatores técnicos, humanos e organizacionais, e das interações resultantes da combinação entre eles.
<i>Staff</i>	Conjunto das pessoas que compõem o quadro de uma instituição. Nesta pesquisa, foram realizadas entrevistas com o gerente de operação, engenheiros de processo, supervisor e operadores de campo e painel.
Tarefas de ação	São tarefas que exigem esforços físicos, por exemplo, abrir e fechar válvulas.
Tarefas de diagnóstico (cognitivas)	São tarefas que estão relacionadas com a percepção de eventos anormais, análise de suas causas para reduzir ou eliminar o problema. Também se relacionam com a questão da atenção, memória, raciocínio, pensamento etc.
<i>Trip</i>	Parada inesperada ou forçada do equipamento devido a algum evento indesejado ou a um eminente perigo.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Definições do termo falha

Quadro A. 1 – Resumo de descrições do termo falha (*failure*) encontrado na literatura.

Autor (ano)	Definição do termo falha
1. Ahmed; Pontiggia; Demichela (2014)	1. Incapacidade de desempenhar uma função pretendida.
2. Sartori et al. (2012)	2. Perda total da capacidade funcional.
3. Bhaumik (2009)	3. A diferença entre o desempenho esperado e o desempenho real de qualquer componente.
4. Tam; Gordon (2009)	4.1 Incapacidade para executar dentro de limites especificados uma função pretendida. 4.2 Perda de função ou mau funcionamento de um sistema / parte do mesmo. 4.3 Não cumprimento ou incapacidade do sistema ou componente de executar sua função requerida durante um tempo especificado sob condições ambientais especificadas. 4.4 Cessação da função que tem consequências para além de um componente ou organização, tornando-se indisponível para desempenhar sua função.
5. Scutti; McBrine (2002)	5. Evento ou uma condição indesejável que se classificam em três diferentes níveis: <ul style="list-style-type: none">• No nível mais simples – sistema ou componente opera, mas não executa a função pretendida (perda de função);• O outro nível relaciona-se com a segurança, isto é, o sistema ou componente executa sua função, mas não é confiável ou seguro (perda de vida útil);• O último nível é aquele em que o sistema ou componente encontra-se inoperável.
6. Dennies (2002)	6. Incapacidade de um componente, máquina ou processo de funcionar corretamente. Mas pode ser classificada em duas categorias: <ul style="list-style-type: none">• Uma máquina ou um processo, falha e tudo para.• Um componente, uma máquina ou um processo, não obtém critérios de desempenho, como limites operacionais e requisitos de especificação.
7. Lafraia (2001)	7. Perda de uma função.
8. Heut (2000)	8. Falha em um sistema de engenharia significa que algo não está desempenhando sua função pretendida, resultando em um comportamento inaceitável ou um acidente.
9. Barringer; Kotlyar (1996)	9. Evento de deterioração que torna o equipamento e os processos incapazes para a finalidade pretendida ou especificada durante um intervalo de tempo designado, que incluem: <ul style="list-style-type: none">• Parada por mau funcionamento;• Cessação da função do componente;• Cessação da satisfação pré-determinada de qualidade, quantidade e expectativas de custo;• Ocorrência inesperada que interrompe a operação rotineira de um sistema.
10. IEV (1990) / ABNT NBR (1994)	10. Terminação da capacidade de um item para executar uma função necessária.

APÊNDICE B

Diagrama de Ishikawa (Geral)

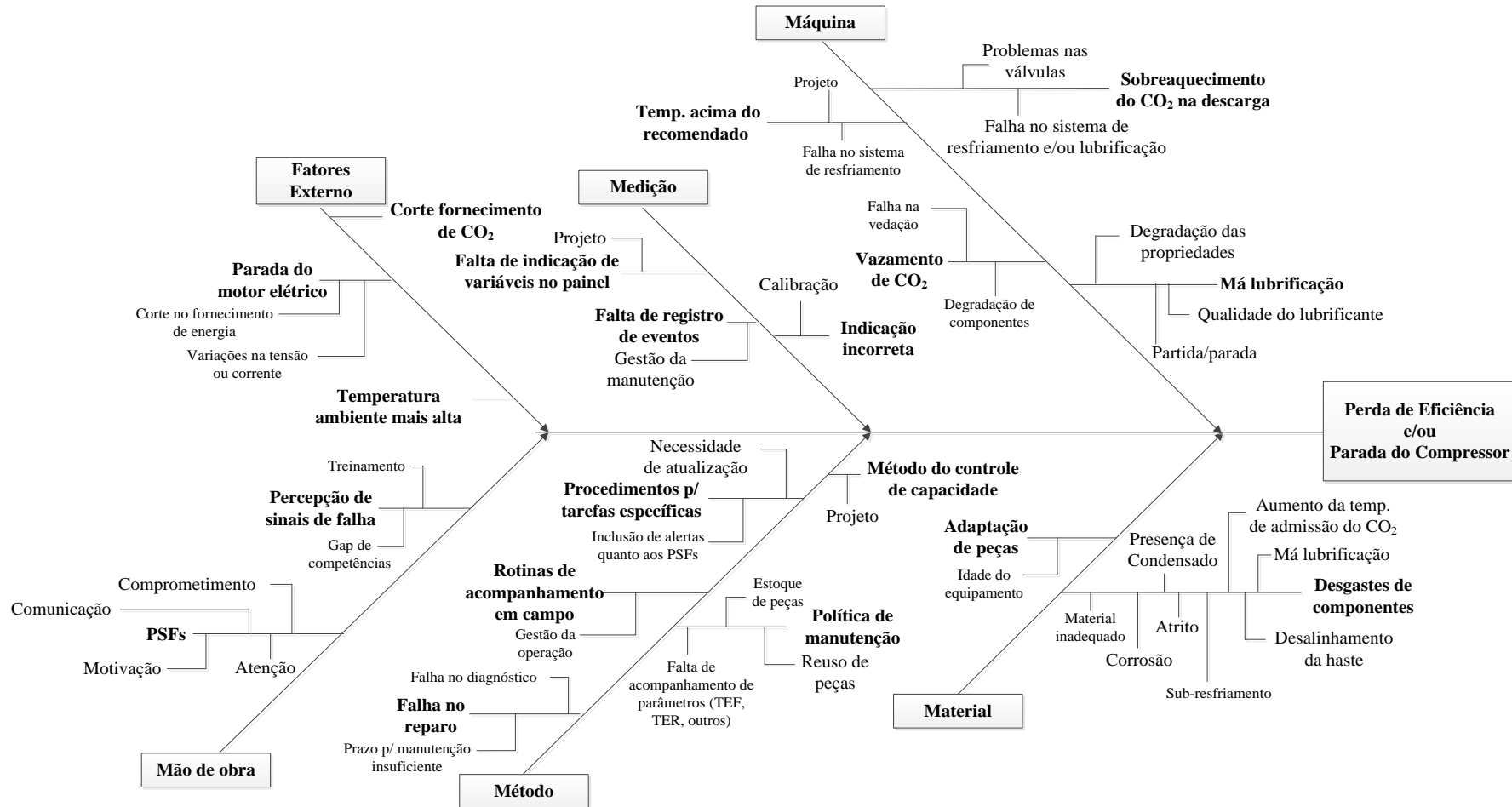


Figura B. 1 – Principais causas de parada do compressor alternativo de CO₂ (C-02).

APÊNDICE C

Diagrama de Ishikawa (Ruído e Vibração)

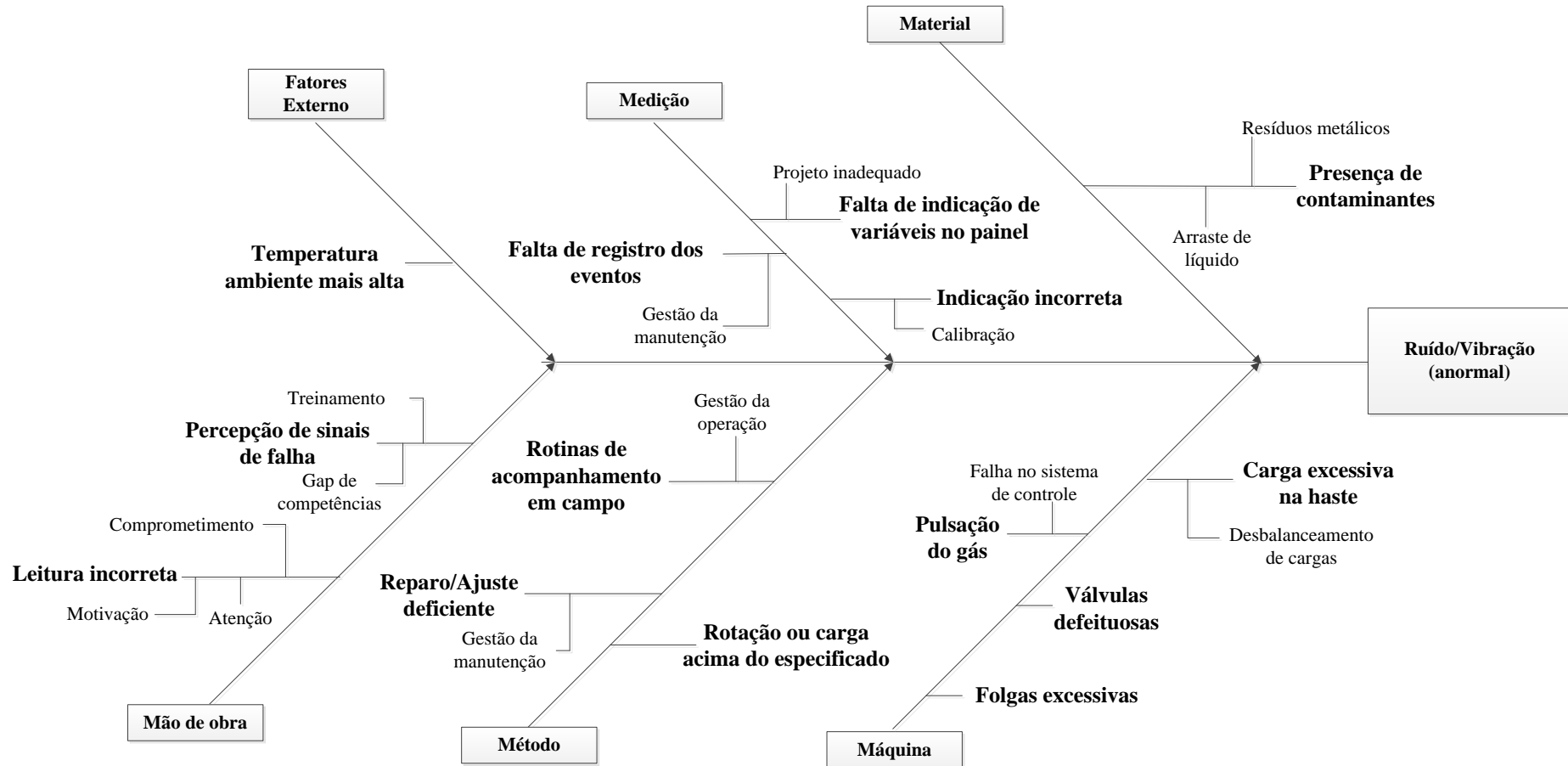


Figura C. 1 – Principais causas de ruído e vibração do compressor alternativo de CO₂ (C-02)

APÊNDICE D

Relação de causa e efeito dos principais elementos que afetam o compressor alternativo de pistão horizontal C-02

Quadro D. 1 – Relação de causa de efeito dos principais fatores que afetam o compressor alternativo C-02.

Variável	Mudança	Causa	Efeito
Pressão de sucção	1.1 Aumento	1.1 Aumento da pressão de suprimento ou da pressão de descarga do compressor <i>booster</i> .	- Elevação da carga do compressor. - Elevação das pressões e temperaturas entre os estágios do compressor.
	2.1 Redução	2.1 Redução da pressão de suprimento ou da pressão de descarga do compressor <i>booster</i> .	- Redução da carga do compressor. - Redução das pressões e temperaturas entre os estágios do compressor.
Pressão de descarga	1. Aumento	1.1 Falha no controle de pressão do reator.	- Vazamentos. - <i>Trip</i> por alta pressão.
Pressão entre estágios	1. Aumento	1.1 Quebra de válvulas na sucção do estágio seguinte.	- Aumento da temperatura e redução da pressão no estágio seguinte. - Abertura da válvula de alívio
Temperatura do gás na sucção	1. Aumento	1.1 Redução de vazão da AGR no permutador da sucção. 1.2 Elevação da temperatura da AGR.	- Aumento das temperaturas interestágios.
	2. Redução	2.1 Aumento de vazão da AGR no permutador da sucção. 2.2 Redução da temperatura da AGR.	Liquefação do CO ₂ com potencial de ocasionar sérios danos ao compressor.
Temperatura do óleo	1. Aumento	1.1 Deficiência do sistema de refrigeração.	Deficiência de lubrificação por alteração na viscosidade do óleo, podendo danificar os mancais.
Temperatura entre estágios	1. Aumento	1.1 Refluxo de válvula de sucção.	Danificar partes do compressor por dilatação térmica.
		1.2 Aumento da temperatura da AGR	
		1.3 Redução da vazão de água de resfriamento.	
	2. Redução	2.1 Aumento da vazão da AGR no permutador da sucção.	Liquefação do CO ₂ danificando internamente o compressor
		2.2 Redução da temperatura da AGR.	
Vibração	1. Aumento	1.1 Defeito do redutor de velocidade	Vazamentos
		1.2 Desalinhamento mecânico ou alinhamento incorreto	Ruídos anormais
		1.3 Folga excessiva nas partes móveis Falha do sistema de suporte das linhas	Ressonância nas linhas ou no próprio compressor

APÊNDICE E

Análise dos resíduos da distribuição Weibull (testes com p-valor)

Informação: p-valores devem ser maiores do que o nível de significância (0,05) para não rejeitar a hipótese nula (Ho).

Normalidade:

Teste

Shapiro : 0,985 | Ho: resíduos normais

Anderson: 0,911 | Ho: resíduos normais

Kstest : 0,970 | Ho: resíduos normais

Média:

Ttest: 0,992 | Ho: resíduos com média zero

Ztest: 0,991 | Ho: resíduos com média zero

Autocorrelação:

Ljung-Box:

p-valor Box-Pierce: 0,580 | Ho: resíduos não são autocorrelacionados

p-valor χ^2 : 0,548 | Ho: resíduos não são autocorrelacionados

Homocedasticidade:

Bresh Pagan:

p-valor Teste F : 0,078 | Ho: resíduos são homocedásticos

White test:

p-valor multiplicador de Lagrange: 0,984 | Ho: resíduos são homocedásticos

p-valor Teste F : 0,987 | Ho: resíduos são homocedásticos

APÊNDICE F

Análise dos resíduos da distribuição normal (testes com p-valor)

Informação: p-valores devem ser maiores do que o nível de significância (0,05) para não rejeitar a hipótese nula (Ho).

Normalidade:

Teste

Shapiro : 0,982 | Ho: resíduos normais

Anderson: 0,929 | Ho: resíduos normais

Kstest : 0,998 | Ho: resíduos normais

Média:

Ttest: 0,991 | Ho: resíduos com média zero

Ztest: 0,991 | Ho: resíduos com média zero

Autocorrelação:

Ljung-Box:

p-valor Box-Pierce: 0,044 | Ho: resíduos não são autocorrelacionados

p-valor χ^2 : 0,029 | Ho: resíduos não são autocorrelacionados

Homocedasticidade:

Bresh Pagan:

p-valor Teste F : 0,062 | Ho: resíduos são homocedásticos

White test:

p-valor multiplicador de Lagrange: 0,996 | Ho: resíduos são homocedásticos

p-valor Teste F : 0,997 | Ho: resíduos são homocedásticos

APÊNDICE G

Roteiro de entrevistas com os operadores para auxiliar na discussão da análise da tarefa e aplicação do SPAR-H

Cargo: _____ Experiência na função: _____

Tempo de empresa: _____

QUESTÕES NORTEADORAS DA ENTREVISTA

1. Os incidentes ou anormalidades são discutidos nas reuniões, e alguma ação é tomada para evitar sua recorrência?
2. Os operadores ajudam a identificar situações susceptíveis a erros em projetos/procedimentos existentes?
3. Os aspectos mentais e físicos das tarefas foram analisados para ambas as atividades de rotina e de emergência?
4. Todas as informações necessárias sobre condições normais e de anormalidades no processo são exibidas na sala de controle? Existe alguma variável importante para o diagnóstico de anormalidades que não está disponível na sala de controle (leitura apenas em campo)?
5. O ambiente de trabalho (temperatura, ruído, iluminação, limpeza geral, etc.) é mantido dentro de limites confortáveis?
6. Existe alguma questão relacionada ao layout que dificulta os operadores desempenharem suas tarefas corretamente?
7. As formas de comunicação na passagem de turno são efetivas para descrever as informações necessárias sobre o estado do processo (condições do processo/produto, desvios de processo, equipamentos fora de serviço, permissões de trabalho, etc.)?
8. Os relatórios de turno são corretamente preenchidos, de forma que, em uma consulta futura, os sinais de anormalidades no processo sejam claramente identificados?
9. Os operadores participam da revisão dos procedimentos operacionais padrão?
10. Como os procedimentos escritos estão apresentados? Um formato passo-a-passo é usado? Diagramas, fotografias, desenhos etc., são usados para esclarecer o texto escrito?
11. As atividades específicas da operação seguem estritamente às orientações contidas nos procedimentos?
12. As manobras da operação são realizadas em sua totalidade via comandos da sala de controle, ou ainda existem tarefas que demandam maior esforço físico? Citar essas atividades.
13. A seleção dos trabalhadores levaram em consideração os critérios apropriados baseados em habilidades físicas, aptidões, experiência etc.?

APÊNDICE H

Roteiro de entrevistas com o *staff* para auxiliar na discussão da análise da tarefa e aplicação do SPAR-H

Cargo: _____ Experiência na função: _____

Tempo de empresa: _____

Cada proposição poderá ter a indicação de uma das opções:

1 - “discordo totalmente”; 2 - “discordo em grande parte”; 3 - “não concordo, nem discordo”; 4 - “concordo em grande parte”; e 5 - “concordo totalmente”.

Questão	Marque sua opção com "X"				
	1	2	3	4	5
Q1. Todos os eventos de falhas e intervenções no equipamento são devidamente registrados e analisados.					
Q2. Os incidentes e anormalidades são discutidos nas reuniões, e ações são planejadas para evitar sua recorrência.					
Q3. Uma análise de causa raiz é realizada sempre que possível levando em conta fatores técnicos, humanos e organizacionais.					
Q4. Os relatórios de turno são corretamente preenchidos, de forma que, em uma consulta futura, os sinais de anormalidades no processo são claramente identificados.					
Q5. Todas as informações necessárias sobre condições normais e de anormalidades no processo são exibidas na sala de controle.					
Q6. Os aspectos mentais e físicos foram analisados para ambas as atividades, de rotina e de emergência.					
Q7. O ambiente de trabalho (temperatura, ruído, iluminação, limpeza geral, etc.) é mantido dentro de limites confortáveis.					
Q8. O processo de projeto e escrita dos procedimentos atendem a quesitos de ergonomia, comunicação, layout, interface homem-máquina.					
Q9. Os operadores ajudam a identificar situações susceptíveis a erros em projetos/procedimentos existentes. Eles também estão envolvidos na avaliação de novos projetos/procedimentos.					
Q10. Os procedimentos operacionais são claros e de fácil acesso.					
Q11. Os procedimentos operacionais são frequentemente consultados.					
Q12. Os procedimentos operacionais não necessitam de melhorias.					
Q13. O uso de procedimentos específicos para o diagnóstico de anormalidades auxilia na identificação de falhas.					
Q14. A inclusão nos procedimentos operacionais de alertas sobre fatores humanos, como necessidade de maior aptidão física ou maior concentração, poderia reduzir as falhas na realização das atividades.					
Q15. Rotinas de acompanhamento em campo do sistema principal e auxiliares são frequentes.					
Q16. As tarefas críticas são executadas seguindo um passo a passo (check-list).					

APÊNDICE I

Publicações decorrentes do desenvolvimento dessa dissertação

FERREIRA, J. F. M. G.; GALVÃO, C. V. M.; SILVA, J. M. P.; ÁVILA FILHO, S. Análise do impacto da baixa confiabilidade operacional nos indicadores de energia de uma refinaria de petróleo. Em: **Congresso da Associação Brasileiro de Risco, Segurança de Processo e Confiabilidade (ABRISCO)**, 3º, 2017, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: [S.n.], 2017.

FERREIRA, J. F. M. G.; LOPES, J. R. N.; ÁVILA FILHO, S.; VIEIRA DE MELO, S. A. B. Impactos no desempenho operacional e energético (potência) devido a paradas não programadas: um estudo de caso de uma unidade de hidrotreatamento de diesel. Em: **Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)**, 37º, Joinville, 2017. Joinville: ABEPRO, 2017.

FERREIRA, J. F. M. G.; ÁVILA FILHO, S.; FONTES, C. H. O.; VIEIRA DE MELO, S. A. B. Análise de falhas de um compressor alternativo de CO₂ através do diagrama de Ishikawa e da distribuição Weibull. Em: **Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção (CONBREPRO)**, 6º, Ponta Grossa, 2016. Ponta Grossa: APREPRO, 2016.

FERREIRA, J. F. M. G.; VIEIRA, L. S.; ÁVILA FILHO, S. Uso da análise de causa raiz e confiabilidade aplicada como ferramentas de apoio para tomada de decisão – um caso da indústria petroquímica. Em: **Simpósio Internacional de Confiabilidade**, 14, Salvador, 2016. Salvador: ReliaSoft Corporation, 2016.

ANEXOS

ANEXO A

Tabela A. 1 – Avaliação de cada PSF para tarefa de ação

PSF	Nível	Multiplicador para ação P(falha)
Tempo Disponível	() Tempo inadequado.	1
	() Tempo disponível \approx tempo requerido.	10
	() Tempo nominal.	1
	() Tempo $\geq 5x$ o tempo requerido.	0,1
	() Tempo $\geq 50x$ o tempo requerido.	0,01
	() Informação Insuficiente.	1
Estresse / Agente Estressor	() Extremo.	5
	() Alto.	2
	() Nominal.	1
	() Informação Insuficiente.	1
Complexidade	() Altamente complexa.	5
	() Moderadamente complexa.	2
	() Nominal	1
	() Informação Insuficiente.	1
Treinamento / Experiência	() Baixo	3
	() Nominal	1
	() Alto.	0,5
	() Informação Insuficiente.	1
Procedimento	() Inexistente	50
	() Incompleto	20
	() Disponível, mas mal elaborado	5
	() Nominal	1
	() Informação Insuficiente	1
Ergonomia	() Não existente / mal projetado	50
	() Ruim	10
	() Nominal	1
	() Bom	0,5
	() Informação Insuficiente.	1
Aptidão para o serviço	() Não apto	1
	() Aptidão degradada	5
	() Normal	1
	() Informação Insuficiente	1
Relações de trabalho	() Ruim	5
	() Normal	1
	() Bom	0,5
	() Informação Insuficiente	1

Fonte: NUREG-6883, 2005

ANEXO B

Tabela B. 1 – Avaliação de cada PSF para tarefa de diagnóstico.

PSF	Nível	Multiplicador para diagnóstico P(falha)
Tempo Disponível	() Tempo inadequado.	1
	() Tempo próximo do nominal (~2/3).	10
	() Tempo nominal.	1
	() Tempo extra (entre 1 e 2x o tempo nominal e > 30 min).	0,1
	() Tempo expansivo (> 2x tempo requerido e > 30 min).	0,01
	() Informação Insuficiente.	1
Estresse / Agente Estressor	() Extremo.	5
	() Alto.	2
	() Nominal.	1
	() Informação Insuficiente.	1
Complexidade	() Altamente complexa.	5
	() Moderadamente complexa.	2
	() Nominal	1
	() Diagnóstico óbvio	0,1
	() Informação Insuficiente.	1
Treinamento / Experiência	() Baixo	10
	() Nominal	1
	() Alto.	0,5
	() Informação Insuficiente.	1
Procedimento	() Inexistente	50
	() Incompleto	20
	() Disponível, mas mal elaborado	5
	() Nominal	1
	() Diagnóstico/orientado para sintomas	0,5
	() Informação Insuficiente	1
Ergonomia	() Não existente / mal projetado	50
	() Ruim	10
	() Nominal	1
	() Bom	0,5
	() Informação Insuficiente.	1
Aptidão para o serviço	() Não apto	1
	() Aptidão degradada	5
	() Normal	1
	() Informação Insuficiente	1
Relações de trabalho	() Ruim	2
	() Normal	1
	() Bom	0,8
	() Informação Insuficiente	1

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>

